

TNO-rapport
TM-99-A078/FEL-99-A211

Visuele Interpretatie van SAR Beelden

TNO Fysisch en Elektronisch
Laboratorium

Oude Waalsdorperweg 63
Postbus 96864
2509 JG 's-Gravenhage

Telefoon 070 374 00 00
Fax 070 328 09 61

Datum
november 1999

Auteur(s)
Dr.ir. A.J.E. Smith
Dr. T. Lourens
Dr. A.C. van den Broek
Dr. A. Toet

~~DTIC USERS ONLY~~

Opdrachtgever	HWO-CO
Projectbegeleider	Ir. J.B.J. Orbons
Onderdeel	DS/CZ-TB

Rubricering	
Vastgesteld door	Ir. J.B.J. Orbons
Vastgesteld d.d.	3 november 1999

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Titel	Ongerubriceerd
Samenvatting	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Bijlagen	Ongerubriceerd

Indien dit rapport in opdracht van het ministerie van Defensie werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Modelvoorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelingsopdrachten' (MVDT 1997) tussen de minister van Defensie en TNO indien deze op de opdracht van toepassing zijn verklaard dan wel de betreffende terzake tussen partijen gesloten overeenkomst.

Exemplaar nr.	12	
Oplage	42	
Aantal pagina's	73	(incl RDP, excl. distributielijst)
Aantal bijlagen	-	

© 1999 TNO

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for Public Release
Distribution Unlimited

20000127 047

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium is onderdeel van TNO Defensieonderzoek waartoe verder behoren:

TNO Prins Maurits Laboratorium
TNO Technische Menskunde



DTIC QUALITY INSPECTED 1

AQF00-04-1004

Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek TNO



TNO Fysisch en Elektronisch
Laboratorium

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK 's-Gravenhage
Postbus 96864
2509 JG 's-Gravenhage

Telefoon 070 374 00 00
Fax 070 328 09 61
E-mail mpc@fel.tno.nl
<http://www.tno.nl>

Datum
november 1999

Auteur(s)
Dr.ir. A.J.E. Smith
Dr. T. Lourens
Dr. A.C. van den Broek
Dr. A. Toet

Rubricering rapport
Ongerubriceerd

TNO-rapport **TM-99-A078/FEL-99-A211**

Opdrachtnr. **A99CO315**

Visuele Interpretatie van SAR Beelden

Achtergrond

Voor ongetrainde waarnemers zijn Synthetische Apertuur Radar (SAR) beelden niet zonder meer goed te interpreteren omdat de afbeelding wezenlijk anders tot stand komt dan bij optische beelden. Multi-polarisatie, speculaire reflectie en een karakteristieke vorm van ruis (speckle) maken dat SAR beelden minder vanzelfsprekend zijn weer te geven op het scherm of op een afdruk.

Doelstelling

De doelstelling van dit project is het ontwikkelen van een weergave (presentatie-techniek) van SAR beelden waarmee de interpretatie van de terreinachtergrond eenvoudiger wordt (terreinanalyse) en waarmee doelen, bijvoorbeeld militaire voertuigen, sneller opgespoord en herkend kunnen worden (doelopsparing).

Omschrijving van de werkzaamheden

Er is een dataset samengesteld van SAR beelden waarvan de terreinachtergrond diverse terreinsoorten bevat en een beeld waarin zich doelen bevinden (Hoofdstuk 3). Het merendeel van de beelden is afkomstig van de PHARUS polarimetrische SAR die een resolutie heeft van 3 m. Uit de PHARUS beelden is één beeld geselecteerd met een diversiteit aan terreinsoorten die karakteristiek zijn voor de meeste SAR beelden en waarin zich tevens man-made objects bevinden, veelal geïsoleerde gebouwen zoals boerderijen. Omdat de resolutie van PHARUS niet genoeg is voor het opsporen van kleine doelen bevat de dataset ook een hoge resolutie (0.5 m) enkelkanaals SAR opname van het Franse ONERA waarin militaire voertuigen te zien zijn. Deze opnamen zijn bewerkt met een aantal presentatietechnieken waarmee zowel het terrein als de doelen duidelijk te interpreteren zijn (Hoofdstuk4). Deze presentatietechnieken houden onder meer in het gebruik van grey tones, false colours waarbij gebruik is gemaakt van twee of drie kleurkanalen, pseudo colours en thematische kleuren.

Om te achterhalen welk van de presentatietechnieken het meest geschikt is, zijn met de bewerkte beelden twee proefpersoonexperimenten uitgevoerd: één voor terreinanalyse (Hoofdstuk 5) en één voor doelopsparing (Hoofdstuk 6). Voor het terreinanalyse-experiment zijn grey tones en false colours tweekanaals en driekanaals beelden aan de ongetrainde waarnemers (proefpersonen) voorgelegd omdat deze presentatietechnieken het meest geschikt bleken voor interpretatie van SAR beelden. Voor het doelopsparingsexperiment is het enkelkanaals beeld gebruikt en een gesimuleerd tweekanaals beeld. In beide experimenten werden de beelden aan de proefpersonen aangeboden op het beeldscherm van een personal computer. Bij het terreinanalyse-experiment moesten de proefpersonen m.b.v. een kleurenpalet en een digitale kwast op het beeldscherm een vijftal terreinsoorten zoals stad en water markeren, alsmede de gebouwen in het beeld aangeven. In het doelopsparingsexperiment moesten de proefpersonen m.b.v. een digitale pen de doelen markeren op het beeldscherm en werd ook de tijd opgenomen om te zien hoe snel dit ging.

MANAGEMENTUITTREKSEL

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium (TNO-FEL) in 's-Gravenhage is één van de instituten die behoren tot de Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO). Hoewel het onderzoek op TNO-FEL in hoofdzaak voor het ministerie van Defensie plaatsvindt, worden ook opdrachten uitgevoerd voor andere ministeries, instellingen en bedrijven.

TNO-FEL heeft ongeveer 800 medewerkers.

De volgende producten vormen de belangrijkste output van de TNO-FEL-organisatie:

- Operations Research & Bedrijfsplanning
- Command & Control en Simulatie
- Electronics & EO/IR
- Wapensystemen
- Telecommunicatie & Beveiliging

Resultaten

Uit een analyse is gebleken dat SAR en optische beelden wezenlijk andere informatie bevatten. Hierdoor is er geen één op één relatie tussen de kleur van een object in een SAR beeld en de kleur van het object in een optisch beeld.

Terreinanalyse

De vijf terreinsoorten worden gemakkelijk herkend in het tweekanaals en het driekanaals beeld. In het enkelkanaals beeld wordt het merendeel van de kale bodem velden verward met lage vegetatie. Deze confusie van kale bodem als lage vegetatie komt voornamelijk tot stand door de speckle in het beeld. Bij een volledig polarimetrische SAR kunnen de drie kanalen worden gebruikt om de speckle te reduceren, hetgeen de confusie van kale bodem aanzienlijk verlaagt. Er blijkt echter dat met een tweekanaals beeld de confusie in gelijke mate kan worden gereduceerd.

Het vinden van gebouwen in een SAR beeld is niet eenvoudig. Dit blijkt uit het feit dat in de beelden gemiddeld slechts 10% van de boerderijen wordt gevonden. De meeste boerderijen worden gevonden in het tweekanaals en het driekanaals beeld.

De tweekanaals en driekanaals SAR beelden presteren beter voor terreinanalyse dan een enkelkanaals SAR beeld. Echter, het derde polarimetrische kanaal voegt weinig aan interpretatie toe.

Doelopsporing

In het enkelkanaals beeld zijn de doelen verreweg het moeilijkst te vinden. Het gesimuleerde tweekanaals beeld geeft verreweg de beste resultaten, d.w.z. ongeveer 85% van de doelen wordt gevonden door de proefpersonen in gemiddeld 25 seconden. Evenals het terreinanalyse-experiment geeft dit resultaat het belang aan van een tweede polarimetrische kanaal ter verbetering van de interpretatie van SAR beelden.

Conclusie

Bij het visueel interpreteren van SAR beelden presteert een tweekanaals weergave van een SAR beeld beter ten behoeve van terreinanalyse en doelopsporing dan een enkelkanaals weergave. Het toevoegen van het derde polarimetrische kanaal voegt weinig aan interpretatie toe. Dit kan worden verklaard doordat twee van de drie kanalen radiometrisch gecorreleerd zijn.

Programmatitel

-

Programmanr.

-

Projectbegeleider

Ir. J.B.J. Orbons,

DSCZ-TB

Projecttitel

-

Projectnr.

60401

Projectleider

Dr. A.C. van den Broek

Projectteam

-

Samenvatting

In opdracht van het Ministerie van Defensie (Centrale Organisatie) is onderzoek gedaan naar de visuele interpretatie van Synthetische Apertuur Radar (SAR) beelden. SAR is een microgolf waarnemingssysteem dat veel in remote sensing en lucht-grond waarneming wordt gebruikt. Voor ongetrainde waarnemers zijn SAR beelden moeilijk te interpreteren doordat deze beelden wezenlijk anders tot stand komen dan optische beelden. De doelstelling van dit project, dat door TNO-FEL en TNO-TM gezamenlijk is uitgevoerd, is het ontwikkelen van een weergave van SAR beelden waarmee terreinanalyse en opsporen van doelen eenvoudiger wordt. Hiertoe werden waarnemingsexperimenten uitgevoerd door ongetrainde waarnemers (proefpersonen) bij een aantal verschillende weergaves van SAR beelden. In totaal zijn er twee proefpersoonexperimenten uitgevoerd: één voor terreinanalyse en één voor doelopsporing. Daarbij zijn o.a. grey tones en false colours beelden aan de proefpersonen voorgelegd. De false colours beelden werden verkregen door twee of drie van de polarisatiekanalen van de SAR aan te sluiten op de kleurkanalen van het beeldscherm. Op deze manier werden enkelkanaals, tweekanaals, en driekanaals beelden verkregen.

In het terreinanalyse-experiment kregen de proefpersonen als taak een SAR beeld te segmenteren of als taak gebouwen te markeren. Bij dit experiment is een viertal verschillende representaties gebruikt. In twee hiervan is enkelkanaalsinformatie gebruikt en bij de andere, tweekanaals- en driekanaals informatie. Bij het segmenteren moesten de beelden in vijf verschillende terreinklassen worden opgedeeld. Uit de resultaten blijkt dat het tweekanaals beeld een beter resultaat levert dan het enkelkanaals beeld, met name bij het markeren van gebouwen, maar dat er tussen het tweekanaals- en driekanaals beeld weinig verschil in resultaat is.

In het doelopsporingsexperiment werden aan de proefpersonen hoge resolutie (50 cm) SAR beelden voorgelegd. Al deze beelden zijn afgeleid van een enkelkanaals VV beeld. Het betrof het originele VV beeld waarin de felle pixels waren opgeschaald, het VV beeld waarop contrastversterking (2σ stretching) is toegepast en een HV, VV tweekanaals beeld waarbij het HV kanaal is gesimuleerd. De personen kregen als taak om zo snel mogelijk alle doelen (voertuigen) in het beeld te markeren. Uit de resultaten blijkt dat in de gesimuleerde tweekanaals representatie er aanzienlijk meer doelen worden gevonden ten opzichte van de enkelkanaals representaties, en tevens dat in deze representatie de doelen veel sneller gevonden worden.

Inhoud

1.	Inleiding.....	7
2.	Beeldvormende radar en SAR.....	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Beeldvormende radar (Real Aperture Radar)	9
2.3	Synthetische Apertuur Radar (SAR).....	11
2.4	Speckle en multi-looking	13
2.5	Polarimetrie.....	14
3.	Samenstellen van de data set met SAR beelden.....	18
3.1	Inleiding	18
3.2	Terreinanalyse.....	19
3.2.1	Data set Amsterdam (stedelijk gebied).....	19
3.2.2	Data set Amersfoort (treinstation)	21
3.2.3	Data set Swynnerton (militair testterrein).....	21
3.2.4	Data set Reichswald (bos).....	22
3.2.5	Data set Freiburg (reliëf).....	22
3.2.6	Data set Heerde (gevarieerd landschap).....	22
3.3	Doeldetectie	23
3.3.1	Data set Swynnerton (doelen).....	23
3.4	Geselecteerde SAR beelden voor terreinanalyse en doelopsporingsexperimenten	23
4.	Inventarisatie van presentatietechnieken.....	31
4.1	Inleiding	31
4.2	Terreinanalyse.....	31
4.2.1	Grey tones enkelkanaals beeld van <i>HH</i>	31
4.2.2	Grey tones beeld van de PWF.....	32
4.2.3	False colours tweekanaals beeld (<i>HH</i> , <i>HV</i>)	32
4.2.4	False colours driekanaals beeld (<i>HH</i> , <i>HV</i> , <i>VV</i>).....	33
4.2.5	False colours driekanaals beeld (<i>HH-VV</i> , <i>HV</i> , <i>HH+VV</i>)	33
4.2.6	Pseudo colours beeld van de PWF.....	34
4.2.7	Thematische kleuren beeld.....	35
4.3	Doelopsporing	36
4.3.1	Grey tones enkelkanaals beeld van <i>VV</i>	43
4.3.2	Geschaald grey tones enkelkanaals beeld van <i>VV</i>	43
4.3.3	Gesimuleerd false colours tweekanaals beeld (<i>HV</i> , <i>VV</i>).....	45
4.4	Geselecteerde presentatietechnieken voor terreinanalyse en doelopsporingsexperimenten.....	49

5.	Terreinanalyse-experiment.....	50
5.1	Voorstudie.....	50
5.2	Beschrijving en uitvoering van het experiment	51
5.2.1	Leerfase.....	52
5.2.2	Segmentatie	53
5.2.3	Markeren van gebouwen	56
5.3	Uitwerking van de resultaten	58
5.3.1	Segmentatie	58
5.3.2	Markeren van gebouwen	60
6.	Doelopsporingsexperiment.....	62
6.1	Beschrijving van het experiment.....	62
6.1.1	Leerfase.....	62
6.1.2	Vastleggen van data	63
6.2	Uitwerking van de resultaten	63
6.2.1	Observatie	66
6.2.2	Zoektijden en gedetecteerde doelen	67
7.	Overzicht van de experimentresultaten	68
7.1	Resultaten terreinanalyse-experiment	68
7.2	Resultaten doelopsporingsexperiment	69
8.	Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.....	70
9.	Referenties.....	71
10.	Ondertekening	72

1. Inleiding

Voor remote sensing wordt veelvuldig gebruik gemaakt van optische sensoren en radar. Vooral Synthetische Apertuur Radar (SAR) wordt veelvuldig ingezet vanwege de relatief hoge resolutie ten opzichte van andere radarsystemen. Beide typen sensoren baseren zich op het principe dat ze een beeld kunnen maken op basis van gereflecteerde electromagnetische straling. In geval van een optische sensor is deze straling afkomstig van het gereflecteerde zonlicht. In geval van SAR wordt de straling door de sensor zelf opgewekt en uitgezonden om na reflectie door het object weer te worden ontvangen door de radarantenne. Ondanks het feit dat zowel optische sensoren als SAR gereflecteerde electromagnetische straling meten, zorgen in geval van SAR, multi-polarisatie, speculaire reflecties en speckle (een vorm van ruis) ervoor dat de informatie in SAR beelden minder vanzelfsprekend te interpreteren is dan in optische beelden.

De informatie in een SAR beeld kan op verschillende manieren zichtbaar worden gemaakt als een kleurenbeeld. Momenteel bestaat er nog geen standaard manier om SAR beelden weer te geven. De doelstelling van dit project, dat gezamenlijk is uitgevoerd door TNO-FEL en TNO-TM, is dan ook het ontwikkelen van een weergave (presentatietechniek) van SAR beelden waarmee:

- de interpretatie van de terreinachtergrond eenvoudiger wordt (terreinanalyse)
- doelen, bijvoorbeeld militaire voertuigen, sneller opgespoord en herkend kunnen worden (doelopsporing).

Om bovenstaande doelstelling te realiseren is voor de volgende uitvoering van het project gekozen.

Er is een inventarisatie gemaakt van SAR beelden die voldoende diverse terreinsoorten bezitten en van SAR beelden waarin zich doelen bevinden (Hoofdstuk 3). De SAR beelden met een diversiteit aan terreinsoorten zijn afkomstig van de PHARUS SAR en hebben een resolutie van 3 m. Deze resolutie is niet toereikend voor het opsporen van kleine doelen. De opname waarin zich de doelen (militaire voertuigen) bevinden is daarom afkomstig van de RAMSES SAR van het Franse ONERA en heeft een resolutie van 0.5 m. Naast het ONERA beeld met de doelen is een SAR beeld uitgekozen waarin voldoende diverse terreinsoorten te zien zijn. Deze twee beelden zijn bewerkt met een aantal presentatietechnieken zodat verscheidene weergaven zijn verkregen (Hoofdstuk 4). Om te bekijken met welke presentatietechniek een SAR beeld het duidelijkst te interpreteren is, zijn er twee proefpersoonexperimenten uitgevoerd met ongetrainde waarnemers; een terreinanalyse-experiment (Hoofdstuk 5) en een doelopsporingsexperiment (Hoofdstuk 6). Bij het terreinanalyse-experiment moesten de proefpersonen m.b.v. een kleurenpalet en een digitale kwast op het beeldscherm van een personal computer verschillende terreinsoorten markeren en bouwen, doorgaans boerderijen, aangeven. In het doelopsporingsexperiment moesten de proefpersonen m.b.v. een digitale pen doelen markeren en werd ook de

tijd opgenomen om te zien hoe snel dit ging. Aan de hand van de experiment-resultaten zal worden geconcludeerd welke weergave van een SAR beeld het best te interpreteren is.

2. Beeldvormende radar en SAR

2.1 Inleiding

De term radar is afkomstig uit het Engels en is een acroniem voor radio detection and ranging. Zoals de naam reeds doet vermoeden is radar oorspronkelijk ontworpen voor detectie van veelal militaire objecten en het bepalen van de afstand van het object tot aan de radar. Hiertoe zendt de radarantenne een electromagnetisch signaal uit met een golflengte die veelal varieert tussen 0.1 cm en 1 m. Signalen met bovengenoemde golflengtes worden aangeduid met kortgolvrige radiosignalen of ook wel microgolven. Na door het object te zijn gereflecteerd wordt het radarsignaal weer door de antenne ontvangen. Met de radarmeting verkrijgen we dus twee grootheden, de afstand tot het object zoals afgeleid uit het tijdstip van uitzenden en het tijdstip van ontvangst, en de sterkte van de radarreflectie. Bij radars die zijn ontworpen voor afstandsbeoordeling staat de tijdmeter centraal en is de reflectie van ondergeschikt belang, mits deze maar sterk genoeg is om het object duidelijk te detecteren. Dit type radar komen we veelvuldig tegen op bijvoorbeeld schepen en op vliegvelden. Ze worden gekarakteriseerd doordat ze veelal om een as draaien om zo de omgeving te surveilleren. Echter, bij beeldvormende radars is het de reflectie van het object waar men in geïnteresseerd is en wordt de tijdmeter eigenlijk alleen maar gebruikt om de positie van de reflectie in het beeld te kunnen bepalen. Dit type radar is vast bevestigd aan het dragende voertuig of platform, bijvoorbeeld een vliegtuig of een satelliet, die de radar voortbeweegt om zo het beeld op te nemen van het terrein waarin men is geïnteresseerd.

2.2 Beeldvormende radar (Real Aperture Radar)

In Figuur 2.1 is de geometrie van een beeldvormende radar weergegeven. Met een bepaald tijdsinterval wordt door de radar een puls uitgezonden. Iedere puls propageert in de richting waarin hij is uitgezonden, de zogenaamde slantrange richting S , totdat hij de grond raakt. Het punt waar de puls de grond als eerste raakt heet near range, terwijl het punt waar de puls als laatste de grond raakt far range wordt genoemd. De richting op de grond van near range naar far range noemen we de groundrange richting. Het beschreven gebied op de grond heet de footprint. De afmeting van de footprint in groundrange richting noemen we de swath. Duidelijk te zien in Figuur 2.1 is dat de radar opzij van het platform kijkt (side looking). Dit is typerend voor alle beeldvormende radars en wordt gedaan om de reflecties van objecten in de swath uit elkaar te kunnen houden met behulp van de tijdstippen van ontvangst. Immers, een reflectie die later wordt ontvangen is afkomstig van een object dat verder naar far range is gelegen. Zou de radar loodrecht naar beneden kijken dan komen alle reflecties van een concentrische cirkel onder het platform tegelijkertijd bij de radarantenne aan en kan van de objecten op deze

cirkel niet worden bepaald waar in het beeld zij zich bevinden. We ontvangen dan als het ware een superpositie van reflecties.

Het terugontvangen signaal van de uitgezonden radarpuls als functie van de tijd noemen we een slanrange lijn of kortweg range lijn. Het eerste tijdstip van de range lijn wordt dus bepaald door de reflectie afkomstig van near range, terwijl het laatste tijdstip van de range lijn afkomstig is van de reflectie van far range. Omdat het platform zich voortbeweegt in de vliegrichting, ook wel azimut richting genoemd, zullen de range lijnen van opeenvolgend uitgezonden pulsen iets verschoven zijn in azimut richting. Alle opgenomen range lijnen naast elkaar vormen in feite het radarbeeld nadat een conversie van slanrange afstand S naar groundrange afstand G heeft plaatsgevonden. Dit laatste kan eenvoudig worden gedaan omdat de vlieghoogte H bekend is.

Een belangrijke parameter van het radarbeeld is de resolutie. Resolutie is gedefinieerd als de kleinste mogelijke afstand tussen twee objecten zodat de radar ze nog van elkaar kan onderscheiden, dat wil zeggen dat de objecten als twee punten in het radarbeeld worden afgebeeld in plaats van als een "samengesmolten" punt.

De resolutie in slanrange richting wordt bepaald door de hoeveelheid signaal die kan worden opgeslagen in de radarpuls, dus door de bandbreedte van de radar. Hoe groter de bandbreedte, hoe beter de resolutie, echter ook hoe duurder de radar. Een grotere bandbreedte betekent namelijk dat er meer data moet worden verwerkt, hetgeen de complexiteit van de radar aanzienlijk kan doen toenemen. Om deze reden zijn er maar weinig beeldvormende radars met een slanrange resolutie beter dan 1 m. Tijdens het processen van het radarbeeld wordt iedere range lijn bemonsterd, dat wil zeggen opgedeeld, in equidistante resolutie elementen ε_s . Voor het beeld is echter niet zozeer de slanrange resolutie ε_s maar de resolutie op de grond van belang, dat wil zeggen de groundrange resolutie ε_G . Het verband tussen slanrange resolutie en groundrange resolutie wordt gegeven door:

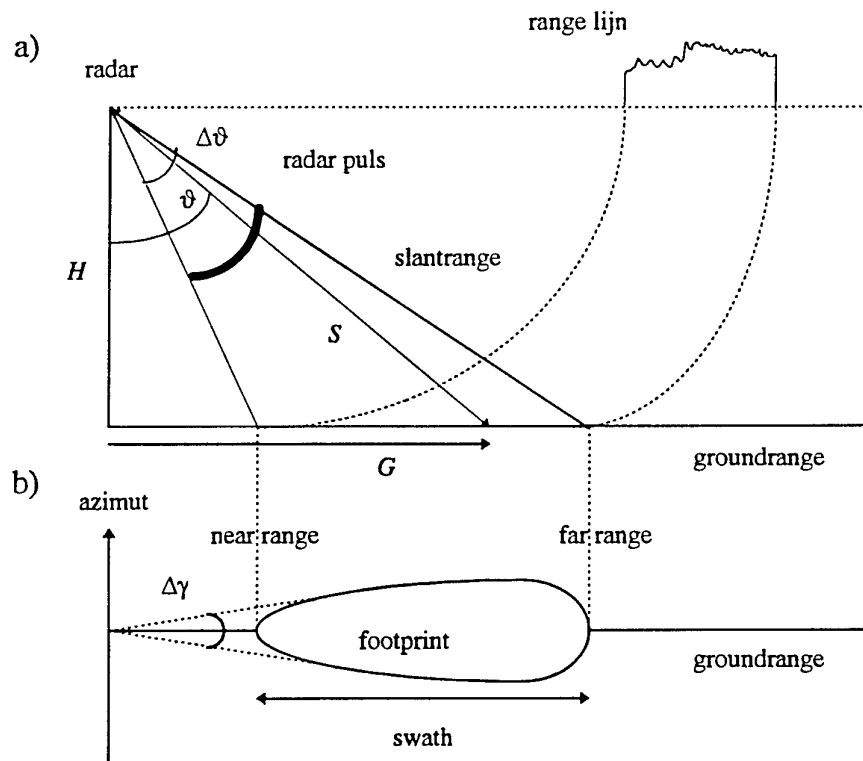
$$\varepsilon_G = \frac{\varepsilon_s}{\sin \vartheta} \quad (2.1)$$

waarbij ϑ de looking angle (inkijkhoek) is behorend bij een bepaalde slanrange afstand S (Figuur 2.1). Vergelijking (2.1) laat zien dat de groundrange resolutie het beste is in far range en afneemt in de richting van near range.

In het radarbeeld wordt de pixel afmeting in groundrange richting vaak ongeveer gelijk gekozen aan de groundrange resolutie in midswath, dat wil zeggen het punt gelegen op de helft van de afstand tussen near range en far range. Ondanks het feit dat de gekozen pixel afstand constant is, is de groundrange resolutie dit niet. Het radarbeeld zal dus het scherpst zijn in de buurt van far range en vager worden in de buurt van near range. Dit is echter alleen zichtbaar als de verticale openingshoek van de bundel $\Delta\vartheta$ in Figuur 2.1 significant groter is dan ongeveer 40° .

De resolutie in azimut richting wordt gegeven door het product van de slanrange afstand en de horizontale openingshoek van de radarbundel $\Delta\gamma$. Zoals Figuur 2.1 laat zien betekent dit dat de azimut resolutie het best is voor near range en afneemt

naar far range. Voor het bereiken van een goede azimuth resolutie is dus een nauwe radarbundel vereist, hetgeen kan worden bereikt met een grote antenne. Met een antennelengte van ongeveer 20 m kan een bundel worden verkregen met een openingshoek van ongeveer 0.1° [Lillesand et al. 1987]. Voor een typische vlieghoogte van 8 km komt dit neer op een gemiddelde azimuth resolutie van ongeveer 20 m, hetgeen een ordegrrootte slechter is dan in groundrange richting. De slechte azimuth resolutie en de afname van azimuth resolutie in far range richting zijn twee grote nadelen van de conventionele beeldvormende radar of Real Aperture Radar. De term Real Aperture Radar duidt erop dat de azimuth resolutie evenredig is met de fysieke lengte van de antenne. Om bovenstaande nadelen te ondervangen heeft men het principe van de synthetische apertuur ingevoerd, hetgeen in de volgende sectie zal worden besproken.

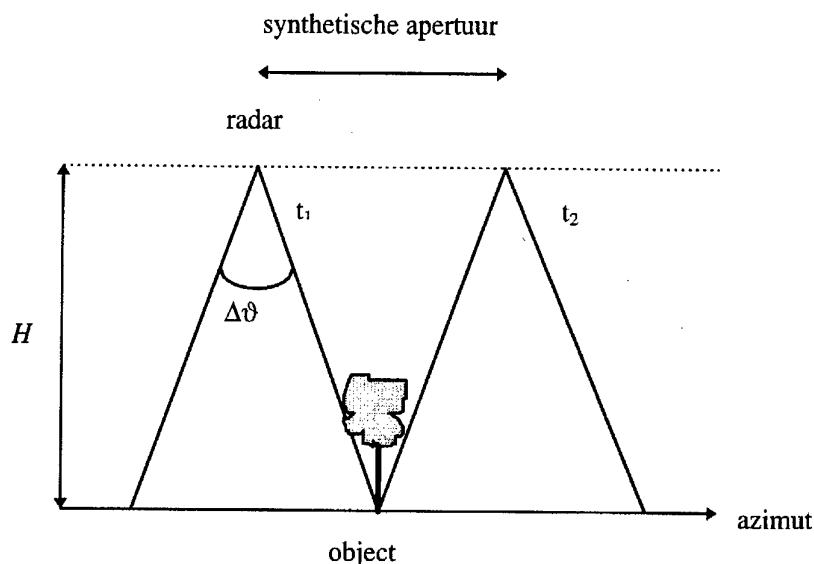


Figuur 2.1: a) Geometrie van een beeldvormende radar. Figuur b) is het bovenaanzicht van Figuur a).

2.3 Synthetische Apertuur Radar (SAR)

Bij een beeldvormende Real Aperture Radar wordt het beeld in azimuth richting opgebouwd door per seconde een aantal radarpulsen uit te zenden. De bijbehorende footprints komen in dit geval naast elkaar te liggen. Bij een

synthetische apertuur radar (SAR) daarentegen is het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende pulsen ongeveer een milliseconde, zodat per seconde duizenden pulsen worden uitgezonden. De footprint van de tweede puls is daardoor in azimuth richting slechts enkele centimeters verschoven ten opzichte van de footprint behorende bij de eerste radarpuls. Dit betekent dat opeenvolgende pulsen elkaar grotendeels overlappen, zodat een object op de grond in meerdere footprints zal worden waargenomen. In geval van SAR wordt een range lijn dus opgebouwd uit meerdere footprints.



Figuur 2.2: Principe van Synthetische Apertuur Radar (SAR).

In Figuur 2.2 is het SAR principe toegelicht. Een object op de grond komt voor het eerst in de radarbundel op tijdstip t_1 en wordt gedurende een tijdsinterval $t_2 - t_1$ dat het platform zich in azimuth richting voortbeweegt in de bundel gehouden. Als gevolg hiervan wordt het object in feite waargenomen door een radar met een lengte die gelijk is aan de afstand die het platform in $t_2 - t_1$ heeft afgelegd. Deze radarlengte wordt de synthetische apertuur genoemd, vandaar de naam Synthetische Apertuur Radar (SAR). Met een waarde voor $t_2 - t_1$ van enkele seconden kan de synthetische apertuur vele honderden meters bedragen, in tegenstelling tot de werkelijke of fysieke radarlengte die voor een SAR slechts 1-2 m is. Zoals besproken in Sectie 2.2, kan met een grote antenne een kleine openingshoek worden verkregen. Met een synthetische lengte van honderden meters wordt zo een denkbeeldige openingshoek van ongeveer 0.01° bereikt, hetgeen voor typische vlieghoogtes van ongeveer 8 km overeenkomt met een azimuth resolutie van de orde grootte van een meter. Deze azimuth resolutie is constant in groundrange richting omdat de footprint van de radarbundel weliswaar breder wordt naar far range (Figuur 2.1), maar hierdoor het object ook langer in de bundel kan worden gehouden. Als voorbeeld, met de PHARUS SAR kan een radar

beeld worden verkregen met een resolutie van 3 m in groundrange en 1 m in azimuth met een antenneafmeting van ongeveer 1 m [van den Broek 1999].

2.4 Speckle en multi-looking

Ondanks het feit dat een SAR in azimuth-richting een resolutie van ongeveer een meter kan behalen, wordt over het algemeen de azimuth resolutie in de processing van het beeld gelijk gemaakt aan de groundrange resolutie. Voor PHARUS betekent dit dat de azimuth resolutie van 1 m opzettelijk wordt verslechterd tot ongeveer 3 m door in de processing een aantal range lijnen te middelen, het zogenaamde multi-looking. Het nut van deze werkwijze is dat de speckle in het beeld wordt gereduceerd. Speckle is een vorm van multiplicatieve ruis die altijd in een radar beeld aanwezig is. Omdat speckle een multiplicatief karakter heeft kan deze niet worden gereduceerd door een radarsignaal uit te zenden met hoger vermogen. Middelen van range lijnen, en ook van polarisatiekanalen in geval van een polarimetrische SAR (zie Sectie 2.5), is de enige manier om speckle tegen te gaan.

Speckle in een radarbeeld ontstaat doordat zich in een resolutie-element objecten bevinden die veel kleiner zijn dan de resolutie in azimuth en groundrange richting, de zogenaamde scatterers. De reflecties van deze scatterers worden coherent opgeteld (een radarsignaal heeft een amplitude en een fase, zie Sectie 2.5) tot een reflectie die wordt toegekend aan het betreffende resolutie-element. Omdat de reflectie-eigenschappen van de scatterers sterk kunnen verschillen en hun optelling coherent is, zal er een zekere mate van toeval in de reflectie van een resolutie-element bestaan. In het beeld komt dit tot uiting doordat verschillende resolutie-elementen in een relatief klein gebied een verschillende sterkte hebben. Dit verschijnsel noemen we speckle.

Multi-looking kan zowel worden toegepast in azimuth als groundrange richting. Het moge echter duidelijk zijn dat multi-looking weliswaar de speckle reduceert, maar de resolutie van het beeld verslechtert. Daarom wordt multi-looking over het algemeen alleen in azimuth richting toegepast en niet in groundrange richting. Het aantal range lijnen waarover wordt gemiddeld wordt over het algemeen zodanig gekozen dat dezelfde resolutie in azimuth als in groundrange richting wordt verkregen. Als voorbeeld, in de meeste PHARUS beelden zijn drie range lijnen gemiddeld, zodat met een bereikbare resolutie in azimuth van 1 m dezelfde resolutie van 3 m wordt verkregen in azimuth zowel als in groundrange richting. Er moet wel worden opgemerkt dat naast elkaar liggende range lijnen niet onafhankelijk zijn doordat de reflecties van een object zullen bijdragen aan een aantal naast elkaar liggende range lijnen. Voor het bovenstaande voorbeeld betekent dit dat multi-looking met drie range lijnen weliswaar een resolutie geeft van 3 m, maar dat het aantal onafhankelijke range lijnen, ook wel genoemd het aantal looks, in een 3x3 m resolutie-element kleiner zal zijn dan drie.

2.5 Polarimetrie

Zoals vermeld in Sectie 2.1 gebeurt detectie van een object met behulp van radar door middel van een electromagnetisch veld dat door de radar wordt uitgezonden en na reflectie door het object weer bij de radar wordt terugontvangen. Met betrekking tot de toepassingen in dit rapport is alleen het elektrische veld van belang en wordt het magnetische veld verder buiten beschouwing gelaten. Het uitgezonden elektrische veld, dat wil zeggen de radarpuls, bestaat uit een sinus van enkele microseconden. Als voorbeeld, voor PHARUS wordt een sinus met frequentie 5 GHz gedurende 13 microseconden uitgezonden [van den Broek 1999]. De uitgezonden elektrische golf heeft een oriëntatie die loodrecht op de voortplantingsrichting staat. Deze oriëntatie wordt ook wel de polarisatie-richting genoemd. Golven met een oriëntatie evenwijdig aan de grond noemen we horizontaal gepolariseerd. Is de oriëntatie loodrecht op het grondvlak dan spreken we van een verticale polarisatie. Polarisation van het elektrische veld komt zowel voor bij radars ten behoeve van afstandsbepaling als bij beeldvormende radars en is dus niet karakteristiek voor SAR.

Bij een polarimetrische radar bestaat het uitgezonden veld uit twee componenten, een horizontaal en een vertikaal gepolariseerde component. De radar zendt een horizontaal gepolariseerde puls uit en registreert de horizontale en verticale reflecties hiervan. Dit geeft respectievelijk de HH en VH reflectie waarbij de eerste index slaat op ontvangst en de tweede index op zenden. Onmiddellijk daarna zendt de radar een vertikaal gepolariseerde puls uit en registreert opnieuw de horizontale en verticale reflecties. Dit geeft respectievelijk HV en VV . De vier combinaties van zend- en ontvangstpolarisaties kunnen we groeperen in een matrix die de scatter matrix $[S]$ wordt genoemd:

$$[S] = \begin{pmatrix} HH & HV \\ VH & VV \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |HH|e^{i\varphi_{HH}} & |HV|e^{i\varphi_{HV}} \\ |VH|e^{i\varphi_{VH}} & |VV|e^{i\varphi_{VV}} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Deze matrix bestaat uit vier complexe getallen die elk met een amplitude en een fase zoals $|HH|$ en φ_{HH} kunnen worden aangegeven. Er geldt dat $VH=HV$, dat wil zeggen, de scatter matrix is symmetrisch vanwege reciprociteit [Lee et al. 1994]. De eenheid van de elementen van $[S]$ is meter. De elementen van de scatter matrix zijn een maat voor de reflectie-eigenschappen van een object. Deze eigenschappen betreffen zowel de sterkte van de reflectie (amplituden van de elementen van $[S]$) als de faseverandering van de uitgezonden pulsen (fasen van de elementen van $[S]$). Met betrekking tot de fasen moet worden opgemerkt dat we alleen geïnteresseerd zijn in de faseverschillen, bijvoorbeeld $\varphi_{HV}-\varphi_{HH}$ en $\varphi_{VV}-\varphi_{HH}$. De absolute fasen zijn niet van belang, immers, zouden we de radar iets verplaatsen, dan nemen alle fasen met hetzelfde bedrag toe. Hierdoor bevat de matrix $[S]$ slechts vijf interessante getallen (3 amplitudes en twee faseverschillen) in plaats van acht. De meting van de matrix $[S]$ vormt voor een polarimetrische radar de feitelijke radarmeting. Het meten van $[S]$ wordt dan ook wel polarimetrie genoemd.

Om twee redenen (zie later) wordt er nooit gewerkt in termen van de scatter matrix $[S]$ maar altijd met de zogenaamde polarimetrische covariantie matrix $[P]$. De polarimetrische covariantie matrix kan als volgt uit de elementen van $[S]$ worden berekend. Uit de elementen van $[S]$ wordt de zogenaamde polarimetrische vector \vec{s} samengesteld:

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} HH \\ HV \\ VV \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

De matrix $[P]$ wordt dan berekend volgens:

$$[P] = \vec{s} \cdot \vec{s}^* = \begin{pmatrix} HH.HH^* & HH.HV^* & HH.VV^* \\ (HH.HV^*)^* & HV.HV^* & HV.VV^* \\ (HH.VV^*)^* & (HV.VV^*)^* & VV.VV^* \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

waarin het * symbool de complex geconjugeerde aanduidt en waarin \vec{s}^* de getransponeerde van de complex geconjugeerde van \vec{s} voorstelt. Door een aantal polarimetrische covariantie matrices te middelen over een groot gebied van enkele honderden resolutie-elementen van een bepaalde terreinsoort, zoals bijvoorbeeld bos of gras, krijgen we een *gemiddelde* polarimetrische covariantie matrix $[C]$:

$$[C] = \langle [P] \rangle = \begin{pmatrix} \langle HH.HH^* \rangle & \langle HH.HV^* \rangle & \langle HH.VV^* \rangle \\ \langle (HH.HV^*)^* \rangle & \langle HV.HV^* \rangle & \langle HV.VV^* \rangle \\ \langle (HH.VV^*)^* \rangle & \langle (HV.VV^*)^* \rangle & \langle VV.VV^* \rangle \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

waarin $\langle \rangle$ betekent dat er moet worden gemiddeld over het aantal resolutie-elementen in het beschouwde gebied. Omdat de matrix $[C]$ karakteristiek is voor de reflectie-eigenschappen van de terreinsoort, ook wel terreinklasse genoemd, waarvoor hij is bepaald, wordt de matrix $[C]$ vaak de klasse covariantie matrix genoemd.

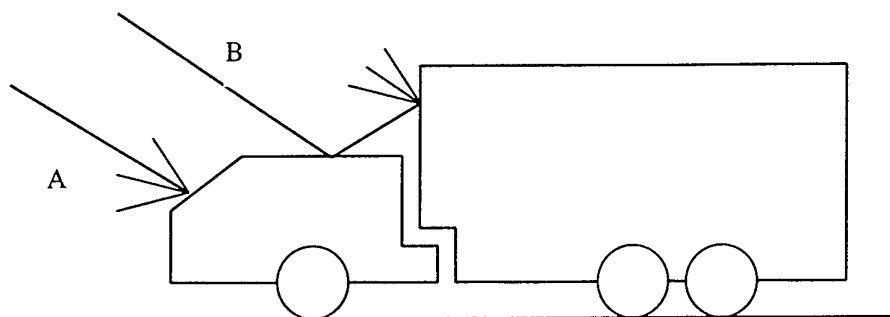
Als het aantal resolutie-elementen waarover gemiddeld wordt groot genoeg is, mogen de co-cross termen $\langle HH.HV^* \rangle$ en $\langle HV.VV^* \rangle$ alsmede hun complex geconjugeerden $\langle (HH.HV^*)^* \rangle$ respectievelijk $\langle (HV.VV^*)^* \rangle$ nul worden gesteld in de matrix $[C]$ [Nghiem 1992]. De co-termen $\langle HH.HH^* \rangle$, $\langle HV.HV^* \rangle$, en $\langle VV.VV^* \rangle$, worden de radardoorsneden genoemd behorend bij een combinatie van uitgezonden en ontvangen polarisatie. Ze worden aangeduid met respectievelijk σ_{HH} , σ_{HV} , en σ_{VV} . Als voorbeeld, σ_{HV} geeft aan hoe sterk de horizontale reflectie is van de vertikaal uitgezonden puls. De radardoorsnede van een object (eenheid m^2) is een maat voor de sterkte van de reflectie. De radardoorsnede houdt niet direct verband met het fysieke oppervlak van het object zoals dat door de radar wordt belicht. Alleen in het geval dat de golflengte vele malen kleiner is dan het fysieke oppervlak geldt dit wel. Met invoering van de radardoorsneden kan (2.5) ook worden geschreven als:

$$[C] = \begin{pmatrix} \sigma_{HH} & 0 & \sigma_{HHVV} e^{i(\varphi_{HH} - \varphi_{VV})} \\ 0 & \sigma_{HV} & 0 \\ \sigma_{HHVV} e^{-i(\varphi_{HH} - \varphi_{VV})} & 0 & \sigma_{VV} \end{pmatrix} = \sigma_{HH} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

De term $\rho = \langle HH.VV^* \rangle / (\sqrt{\sigma_{HH}\sigma_{VV}}) = e^{i(\varphi_{HH} - \varphi_{VV})}$ is de correlatie tussen de HH en VV kanalen waarin $\varphi_{HH} - \varphi_{VV}$ het gemiddeld faseverschil tussen deze kanalen is. De termen ε en γ zijn de verhoudingen tussen de radardoorsneden, dat wil zeggen $\varepsilon = \sigma_{HV}/\sigma_{HH}$ en $\gamma = \sigma_{VV}/\sigma_{HH}$. Het faseverschil $|\varphi_{HH} - \varphi_{VV}|$ geeft een indicatie van het onderliggend reflectiemechanisme. Is dit faseverschil 180° dan hebben we te maken met een zogenaamde “even bounce” reflectie (tweewegs reflectie, vierwegs reflectie, etc., zie Figuur 2.3). Is het faseverschil 0° dan is er sprake van een “odd bounce” reflectie (directe reflectie of single bounce, driewegs reflectie of trihedral, etc., zie Figuur 2.3).

Correlatie en faseverschil zijn beide afhankelijk van de reflectie-eigenschappen van het object en zijn alleen goed gedefinieerd als er over een groot aantal resolutie-elementen is gemiddeld. Merk op dat de radardoorsneden σ en het faseverschil $\varphi_{HH} - \varphi_{VV}$ in (2.5) betrekking hebben op gemiddelden van een groep resolutie-elementen. Ze zijn dus niet te relateren aan de scatter matrices (2.2) van de afzonderlijke resolutie-elementen. Alleen in geval dat het pixel een puntbron is, bijvoorbeeld een reflector of een klein militair doel ter grootte van een resolutie-element, zijn de elementen van $[C]$ één op één gerelateerd aan de elementen van $[S]$. In zo'n geval vindt er in (2.5) namelijk geen middeling plaats over resolutie-elementen, zodat de radardoorsneden en faseverschillen tussen de kanalen als karakteristiek kunnen worden gezien voor dat ene punt (er is dus ook geen sprake van speckle). Voor een puntbron zijn de co-cross termen in (2.5) niet gelijk aan nul.

De redenen om met $[P]$ te werken in plaats van met $[S]$ zijn als volgt. Ten eerste willen we het effect van speckle op de radardoorsneden en correlatie tussen de co-kanalen van een terreinklasse kunnen reduceren met behulp van middelen over resolutie-elementen. Alleen op deze manier worden radardoorsneden en correlatie verkregen die karakteristiek zijn voor een terreinklasse. Middelen van de scatter matrices zelf is uiteraard niet mogelijk omdat de elementen van $[S]$ per resolutie-element sterk kunnen verschillen en zo tot nul kunnen middelen. Een tweede reden om met $[P]$ te werken is dat we zo een faseverschil tussen het HH en VV kanaal krijgen, hetgeen gemiddeld over een groot aantal resolutie-elementen resulteert in $\varphi_{HH} - \varphi_{VV}$.



Figuur 2.3: A: Het odd bounce (als voorbeeld de directe of single bounce reflectie) en B: het even bounce (als voorbeeld de dihedral of double bounce reflectie) scatter mechanisme.

3. Samenstellen van de data set met SAR beelden

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een inventarisatie besproken van SAR beelden die bruikbaar zijn voor het terreinanalyse-experiment en het doelopsporings-experiment. Voor het terreinanalyse-experiment betekent dit vooral dat het beeld voldoende verscheidenheid aan terreinsoorten moet bevatten terwijl voor het doelopsporingsexperiment vooral de resolutie van het beeld hoog genoeg moet zijn om de doelen duidelijk van de omgeving te kunnen onderscheiden. De beelden voor het terreinanalyse-experiment zijn alle afkomstig van PHARUS, een C-band SAR met een golflengte van ongeveer 6 cm. Deze beelden zijn polarimetrisch opgenomen en de resolutie bedraagt 3 meter in groundrange en azimut. De pixelgrootte van de PHARUS beelden in dit rapport bedraagt over het algemeen de helft van de resolutie, dat wil zeggen 1.5 meter. Voor met het oog detecteren van doelen met een afmeting van enkele meters is een resolutie van 3 meter uiteraard niet voldoende en moet naar een resolutie van een meter of beter worden gestreefd. Daarom is voor het doelopsporingsexperiment een opname van de RAMSES SAR van het Franse ONERA bekeken. Deze SAR heeft een resolutie van 0.5 meter en opereert in de Ka-band met een golflengte van ongeveer 1 cm. Het is echter geen polarimetrische SAR maar een enkelkanaals (VV) SAR. Het RAMSES beeld bestaat daarom alleen uit een VV opname waarbij de pixelafmeting gelijk is gekozen aan de resolutie.

De polarimetrische SAR beelden in dit hoofdstuk zijn afgebeeld met de representatie gangbaar op TNO-FEL, dat wil zeggen dat het *HH*, *HV* en *VV* polarisatiekanaal op respectievelijk het rode (R), groene (G) en blauwe (B) kleurenkanaal wordt aangesloten. Op deze manier wordt een vrij natuurlijke indruk verkregen, dat wil zeggen een indruk die redelijk overeenkomt met een optisch beeld. Ook gangbaar is dat de waarden van de polarisatiekanalen in het beeld in decibel (dB) worden weergegeven. Voor bijvoorbeeld het *HH* kanaal betekent dit dat de waarde van *HH* zoals verkregen uit de polarimetrische covariantie matrix [*P*] wordt omgerekend volgens:

$$HH(dB) = 10 \log |HH|^2 \quad (3.1)$$

De reden om in dB te werken in plaats van met een lineaire schaal is dat de lineaire waarden van de polarisatiekanalen soms wel 6 ordegroottes kunnen verschillen. Dit bereik is uiteraard veel te groot om te kunnen weergeven met de doorgaans 256 kleurniveaus waarover een monitor of printer de beschikking heeft. Door in dB te werken wordt dit bereik aanzienlijk verkleind, omdat in de dB schaal de waarden doorgaans tussen -30 dB en 30 dB liggen. Uiteraard betekent het werken in dB's wel dat er een nivellering van beeldintensiteit plaatsvindt, de sterke reflecties worden naar beneden geschaald en de zwakke reflecties worden opgeschaald. Om het contrast te optimaliseren zijn de drie kleurkanalen van de PHARUS beelden in Sectie 3.2 2σ gestretcht (zie Sectie 4.2.1 voor uitleg). Tenzij anders vermeld zijn

de beelden zodanig weergegeven dat de vliegrichting steeds samenvalt met de horizontale richting van de bladzijde en de kijkrichting van de SAR met de verticale richting van de bladzijde (onderkant komt soms overeen met near range en soms met far range). Het bereik van de inblikhoek (looking angle) voor de PHARUS beelden ligt tussen 40° en 60°. Voor de opname van Swynnerton is dit bereik 70°-80°. Enige gegevens van de geïnventariseerde SAR beelden zijn te vinden in Tabel 3.1.

Tabel 3.1: Algemene gegevens van de geïnventariseerde SAR beelden (data sets). De looking angle van alle beelden heeft een bereik van 40°-60° behalve voor de beelden van Swynnerton waar dit bereik 70°-80° bedraagt.

Data set	Omschrijving terrein	Opname datum	Afmeting gebied (km)	Pixel afmeting (m)
Amsterdam	Stad	29/5/1997	8 x 8	1.5
Amersfoort	Treinstation	25/4/1996	3 x 4	2
Swynnerton (Engeland)	Militair testterrein	24/10/1996	8 x 12	1.5
Reichswald	Bos	22/10/1996	8 x 8	3
Freiburg (Duitsland)	Relief	23/10/1997	10 x 12	1.5
Heerde	Gevarieerd landschap	21/6/1997	8 x 10	1.5
Swynnerton (ONERA)	Zie boven	30/9/1996- 25/10/1996	0.8 x 1	0.5

3.2 Terreinanalyse

3.2.1 Data set Amsterdam (stedelijk gebied)

Figuur 3.1 is een SAR opname van Amsterdam. Duidelijk herkenbaar als de honingraatstructuur rechtsonder in het beeld zijn de flats van de Bijlmermeer. Als we Figuur 3.1 zouden vergelijken met een optisch beeld, bijvoorbeeld een luchtfoto, dan zouden we meteen duidelijke verschillen zien. Het meest sprekend is dat water in een SAR beeld zwart kleurt. Rechtsboven in het beeld is namelijk de haven te zien, linksboven zien we de Amsterdamse grachten, en de rivier aan de linkerkant van het beeld is de Amstel. Ook opvallend is dat het hele beeld ietwat groen aandoet, dat wil zeggen naast grasland en bos kleuren ook wegen en delen van stedelijke gebieden groen. Een ander punt dat in het oog springt zijn de felle rode reflecties afkomstig van delen van stedelijke gebieden boven en links in het beeld. Al deze verschillen tussen een SAR beeld en een optisch beeld kunnen grotendeels worden verklaard door een samenspel van een drietal oorzaken. Ten eerste worden de kleuren in SAR beelden op een kunstmatige manier opgewekt door de *HH*, *HV* en *VV* polarisatiekanalen op respectievelijk de R, G en B kleurkanalen weer te geven. De kleur van een object in een SAR beeld zal dus slechts in uitzonderingsgevallen overeenstemmen met de ware kleur van het object. Om deze reden geeft het beeld een groene indruk. Van de drie polarisatiekanalen is *HV* namelijk het zwakst en dit kanaal ligt ongeveer 10 dB onder de andere twee kanalen. Door de drie polarisatiekanalen gestretcht weer te geven op de drie kleurkanalen, wordt het *HV* kanaal opgetrokken tot gelijke hoogte met de andere twee kanalen. Met name voor terreinsoorten als gras en bos, die een

significante *HV* component hebben, betekent opschalen van het *HV* kanaal dat ze groen zullen kleuren in het beeld. Stad en kale bodem, die een significante *HH* en *VV* component hebben, zullen rood/blauw blijven. Er wordt daarom met nadruk op gewezen dat met name de kleur groen in een SAR beeld op kunstmatige wijze is verkregen, hetgeen echter wel een natuurlijke indruk geeft doordat bos en gras zo een groene kleur verkrijgen.

Ten tweede heeft een object andere reflectie-eigenschappen voor zichtbaar licht dan voor microgolven. Een object kan bijvoorbeeld een groot deel van het invallende zonlicht absorberen, zodat het op een luchtfoto moeilijk te zien is terwijl het microgolven juist grotendeels reflecteert, zodat het op een SAR beeld goed te zien zal zijn. Een goed voorbeeld hiervan zijn metalen structuren zoals voertuigen maar ook treinrails of bijvoorbeeld hoogspanningsmasten die te zien zijn als de puntvormige reflecties in de Amsterdamse haven (Figuur 3.1). De reflectie-eigenschappen komen ook tot uiting in het scatter mechanisme van het object. Als de ruwheid van het object minder dan een kwart golflengte van de straling bedraagt is het oppervlak glad te noemen. Het reflectiemechanisme is dan speculair oftewel spiegelend. Dit betekent dat invallende straling onder een gelijke hoek wordt gereflecteerd zodat er maar weinig zal terugvallen op de sensor. Is de ruwheid van het object groter dan een kwart golflengte, dan is het reflectiemechanisme diffuus. De invallende straling wordt dan in alle richtingen verstrooiend gereflecteerd. Omdat licht een golflengte heeft in de ordegrootte van een micrometer, zullen vrijwel alle objecten het zonlicht diffuus reflecteren, zodat er altijd een reflectie met de optische sensor wordt waargenomen. Voor radar, waarbij de golflengtes centimeters tot een meter bedragen, is dit veel minder het geval en kunnen er speculaire reflecties optreden waardoor er maar weinig straling op de radarantenne terugvalt. Een goed voorbeeld hiervan zijn de waterpartijen in Figuur 3.1. Bij rustig weer is het water glad en fungeert zo als een spiegelend oppervlak voor het radarsignaal. Met een inkijkhoek voor midswath van ongeveer 50° komt er dus vrijwel geen signaal terug bij de SAR antenne waarmee de zwarte kleur van de waterpartijen wordt verklaard (R, G en B zijn ongeveer nul). Ten derde is de invalshoek van de straling anders voor zichtbaar licht dan voor SAR. In geval van zichtbaar licht wordt de invalshoek bepaald door de stand van de zon. Voor SAR gebeurt dit door de looking angle van de radar en de vliegrichting van het SAR platform. Als gevolg van de looking angle en vliegrichting zullen gebouwen parallel aan de vliegrichting de invallende straling gebundeld reflecteren, hetgeen duidelijk te zien is als de felle rode reflecties boven in het beeld (Figuur 3.1). Gebouwen die niet parallel aan de vliegrichting staan bundelen de invallende straling ook maar sturen die naar een andere richting dan de SAR. Dit is duidelijk te zien bij de flats van de Bijlmermeer waar alleen de flats die parallel aan de vliegrichting staan fel rood kleuren terwijl flats met een andere oriëntatie een veel minder sterke reflectie vertonen. Het feit dat bij gebouwen de radarstraling wordt gebundeld kan worden verklaard doordat de muur van het gebouw en het wegdek aan de voorkant van het gebouw als een dihedral fungeren (zie Sectie 2.5). Odd bounce reflecties (direct, single bounce of trihedral) kunnen in woonwijken ook een rol spelen hoewel trihedral scattering niet zo vaak zal

voorkomen. Over het algemeen reflecteren zowel de muur als het wegdek speculair. Echter, als gevolg van aanplant, bijvoorbeeld tuinen of perken, kan het grondvlak ook diffuus reflecteren. Dit zou kunnen verklaren waarom er in woonwijken naast sterke ook minder sterke dihedral reflecties te zien zijn. Het feit dat de dihedral reflecties in woonwijken een rode kleur hebben duidt erop dat de reflecties dominant *HH* zijn. Dit is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van de horizontale woonrijen in deze wijken.

3.2.2 Data set Amersfoort (treinstation)

Figuur 3.2 laat een opname zien van Amersfoort. De opname bestaat vooral uit bosgebied (groen, links in het beeld) en stad (groen en rood, rechts in het beeld). De korrelige structuur van het bos wordt veroorzaakt doordat de 3 m resolutie van PHARUS kleiner is dan de afmeting van de meeste boomkruinen. Hierdoor kunnen de bomen afzonderlijk worden waargenomen. De felle witte reflecties rechtsboven in het beeld zijn afkomstig van treinstellen en rails van station Amersfoort. De witte kleur duidt op gelijke grootte van R, G, en B, hetgeen betekent dat de *HH*, *HV* en *VV* reflecties van het station ongeveer even sterk moeten zijn. Onder in het beeld zijn op de snelweg sterke *HH* reflecties te zien. Deze zijn waarschijnlijk afkomstig van de vangrail omdat deze een horizontale structuur heeft parallel aan de vliegrichting van de SAR.

3.2.3 Data set Swynnerton (militair testterrein)

In Figuur 3.3 is een opname te zien van een oud munitiecomplex in het Engelse plaatsje Swynnerton. Het landschap bestaat voornamelijk uit bos (korrelig groen) en landbouwgronden (voornamelijk lage vegetatie wat groen kleurt en kale bodem velden met een paars/blauwe kleur). De paars/blauwe kleur duidt erop dat kale bodem velden voornamelijk *HH* en *VV* reflecteren. Dit is te verwachten omdat *HV* reflecties een verdraaiing van polarisatie-richting vereisen en daarmee dus enige ruwheid van het oppervlak zoals vooral het geval is voor bos. Opvallend in deze figuur is de sterke reflectie aan de voorkant van bospartijen en bomenrijen (de kijkrichting van de SAR in deze figuur is van de bovenkant naar de onderkant van het beeld). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door zowel dihedral als trihedral scattering mechanismes (zie ook Sectie 3.2.1). Een andere verklaring voor de sterke reflecties aan de bosranden kan lay-over zijn (zie later, Sectie 3.2.5). Ook opvallend in Figuur 3.3 zijn de lange schaduwen die worden veroorzaakt doordat de SAR scherend heeft ingekeken, dat wil zeggen met een grote inkijkhoek (70°-80°). Schaduw in een SAR beeld en in een optische beeld komen op identieke wijze tot stand, namelijk doordat er een object tussen de sensor en een positie op het aardoppervlak staat, zodat er geen straling op deze plek komt en er dus ook geen reflectie van deze plek wordt waargenomen. Midden in het beeld bevinden zich een aantal militaire doelen die in dit beeld moeilijk waar te nemen zijn. In Sectie 3.3.1 zal dit deel van het beeld zoals opgenomen met de hoge resolutie RAMSES SAR van ONERA worden besproken met oog op het doelopsporingsexperiment.

3.2.4 Data set Reichswald (bos)

Figuur 3.4 is een opname van het Reichswald in Duitsland. Het beeld bestaat hoofdzakelijk uit aangeplant bos (midden van het beeld) en landbouwgronden (lage vegetatie en kale bodem). De opname laat duidelijk zien dat het Reichswald uit twee typen bos bestaat. In het midden zien we loofbos (doffe kleur groen) en aan de rand van het Reichswald zien we naaldbos (fellere kleur groen). Er wordt nogmaals op gewezen dat de kleur groen in een SAR beeld voornamelijk wordt veroorzaakt door het stretchen van het *HV* kanaal, zodat het bos in werkelijkheid een andere kleur groen zal hebben dan deze figuur laat zien. De pixelgrootte van dit beeld is 3 m in plaats van 1.5 m. Dit heeft echter geen nadelige invloed op de duidelijkheid van het beeld omdat er weinig meer detail te zien is dan grote percelen bos en landbouwgronden.

3.2.5 Data set Freiburg (reliëf)

Figuur 3.5 laat een opname van het Zwarte Woud zien in Duitsland. Dit gebied bestaat voornamelijk uit middelgebergte (hoogte tot ongeveer 1 km) begroeid met bos met in het midden een dal waarin landbouwgronden en het dorpje Kirchzarten te zien zijn. Het stedelijk gebied aan de linkerkant van het beeld is een deel van de stad Freiburg. In deze opname heeft de SAR aan de linkerkant van het beeld gevlogen, hetgeen duidelijk te zien is doordat de schaduwkant van de bergen zich steeds aan de rechterkant bevindt. Interessant om op te merken is dat de bergen een geometrische vervorming vertonen, dat wil zeggen dat de bergtoppen niet op hun ware positie worden afgebeeld maar te dicht naar de SAR toe. Dit is het duidelijkst te zien linksonder in het beeld aan de hand van de langgerekte schaduwzijden van de bergen. Deze geometrische vervorming wordt toepasselijk fore-shortening genoemd en treedt op in reliëfrijk gebied indien de inkijkhoek van de SAR relatief klein is, dat wil zeggen indien er steil wordt ingekeken. Fore-shortening ontstaat doordat een punt met een hoogte boven het aardoppervlak met een kleinere slantrange wordt gemeten dan als het zich op het aardoppervlak zou bevinden. Hierdoor wordt bij de conversie van slantrange naar groundrange coördinaten het punt te dicht bij de SAR afgebeeld. Een extreme vorm van fore-shortening treedt op indien het terrein een sterke gradiënt heeft, zoals bij steil oplopende bergen het geval is. Hierdoor kan het zijn dat een punt op grote hoogte (bijvoorbeeld de top van een berg) dichterbij de SAR wordt afgebeeld dan een punt op lagere hoogte (het dal). Dit verschijnsel wordt lay-over genoemd. Als gevolg van lay-over kunnen ook meerdere punten in reliëfrijk gebied dezelfde slantrange krijgen waardoor ze op dezelfde groundrange afstand worden afgebeeld. Dit verklaart gedeeltelijk de sterke reflecties die aan bosranden optreden (Sectie 3.2.3). Op de problematiek van fore-shortening/lay-over wordt in dit rapport niet verder ingegaan, zij het dat moet worden opgemerkt dat SAR beelden voor fore-shortening kunnen worden gecorrigeerd [Lillesand 1987].

3.2.6 Data set Heerde (gevarieerd landschap)

Figuur 3.6 geeft een opname van het Heerde gebied in de provincie Overijssel ten noorden van Deventer. De opname laat een grote diversiteit aan terreinsoorten

zien, te weten lage vegetatie (groen, vooral gras), bos (korrelig groen), kale bodem velden (paars/blauw), stad (rood, rechtsboven in het beeld) en water. De stad in het beeld is Olst en de rivier is de IJssel. De lichte zoom aan de bovenkant van het beeld (near range in dit geval) is een artefact en wordt veroorzaakt door een onvolledige antennebundelcorrectie van de SAR waardoor de bovenkant van het beeld een te hoge intensiteit krijgt [van den Broek 1999].

3.3 Doeldetectie

3.3.1 Data set Swynnerton (doelen)

Figuur 3.7 geeft de enkelkanaals VV opname van het Swynnerton munitiecomplex weer zoals verkregen met de hoge resolutie RAMSES SAR tijdens de MIMEX (Military Imaging Experiment) meetcampagne [van den Broek 1999]. Tijdens deze internationale campagne (30 september - 25 oktober 1996) zijn er verscheidene doelopsporingsexperimenten uitgevoerd waaronder opnamen met SAR systemen als PHARUS en RAMSES. Het terrein bestaat voornamelijk uit lage vegetatie (gras) en bos. Net als de Swynnerton opname verkregen met PHARUS heeft ook hier de RAMSES SAR scherend ingekeken, hetgeen de lange schaduwen verklaart. In het centrale deel van het beeld zijn voor de campagne vijf militaire voertuigen neergezet. De voertuigen hebben een karakteristieke afmeting van ongeveer 10 m en zijn herkenbaar als de felle reflecties midden in het beeld (E t/m I). Met oog op het doelopsporingsexperiment in dit rapport zijn er met het beeldbewerkingsprogramma ERDAS [ERDAS 1995] een zestal doelen verspreid over het beeld bijgezet (A t/m D, J, en K). Deze doelen waren dus niet werkelijk in de MIMEX campagne aanwezig.

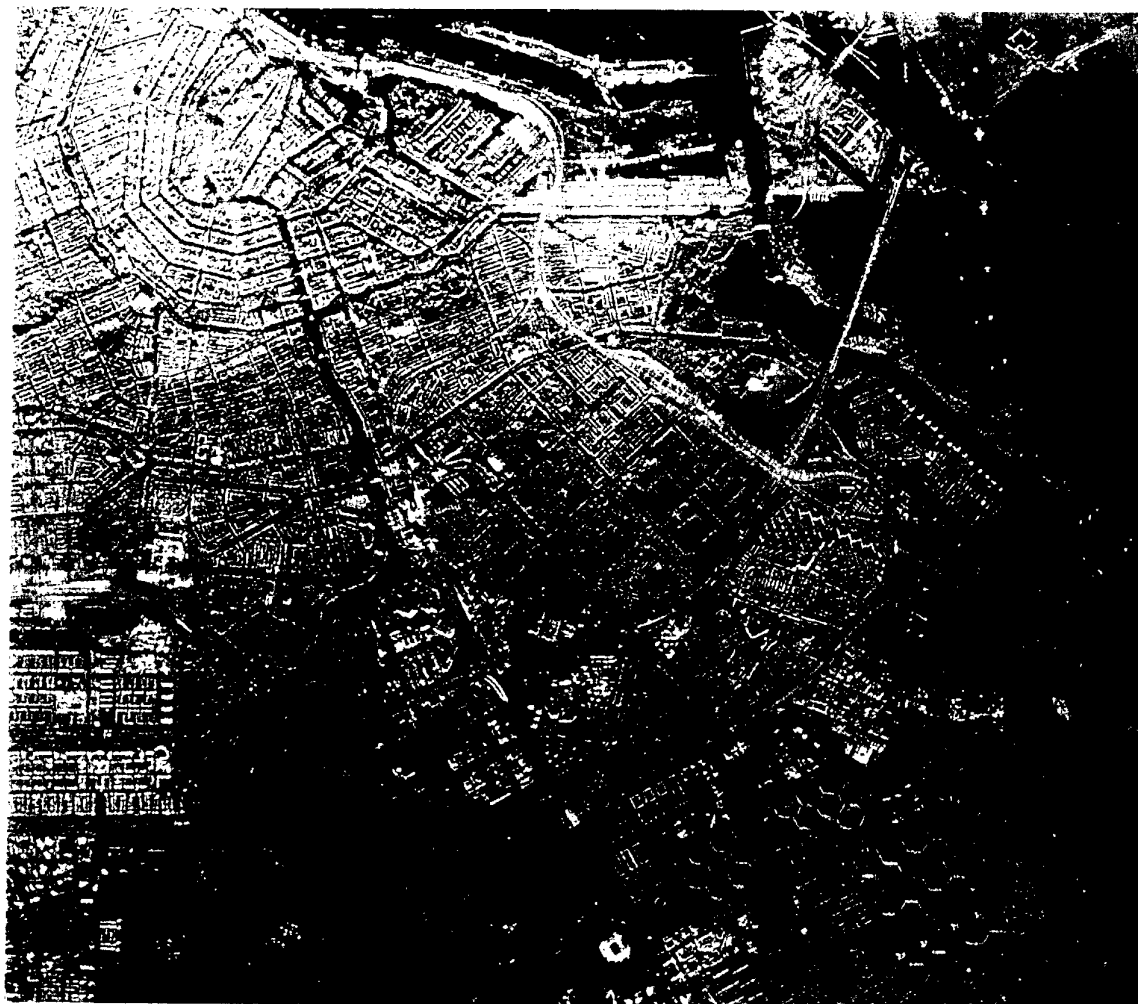
3.4 Geselecteerde SAR beelden voor terreinanalyse en doelopsporingsexperimenten

In deze sectie wordt kort toegelicht welke SAR beelden zijn geselecteerd voor het terreinanalyse-experiment en het doelopsporingsexperiment.

Voor het terreinanalyse-experiment is de Heerde data set (Sectie 3.2.6) geselecteerd om de reden dat deze data set alle terreinsoorten bevat die over het algemeen in een SAR beeld voorkomen: water, stedelijk gebied, bos, lage vegetatie, en kale bodem velden. De overige data sets concentreren zich min of meer op één van deze terreinsoorten. Zo wordt bijvoorbeeld de opname van Amsterdam gedomineerd door stedelijk gebied, en de opname van Amersfoort door bos.

Voor het doelopsporingsexperiment is uiteraard de Swynnerton data set verkregen met de RAMSES SAR van ONERA (Sectie 3.3.1) gekozen, omdat dit de enige hoge resolutie SAR opname is waarover TNO-FEL/TM op dit moment de beschikking hadden.

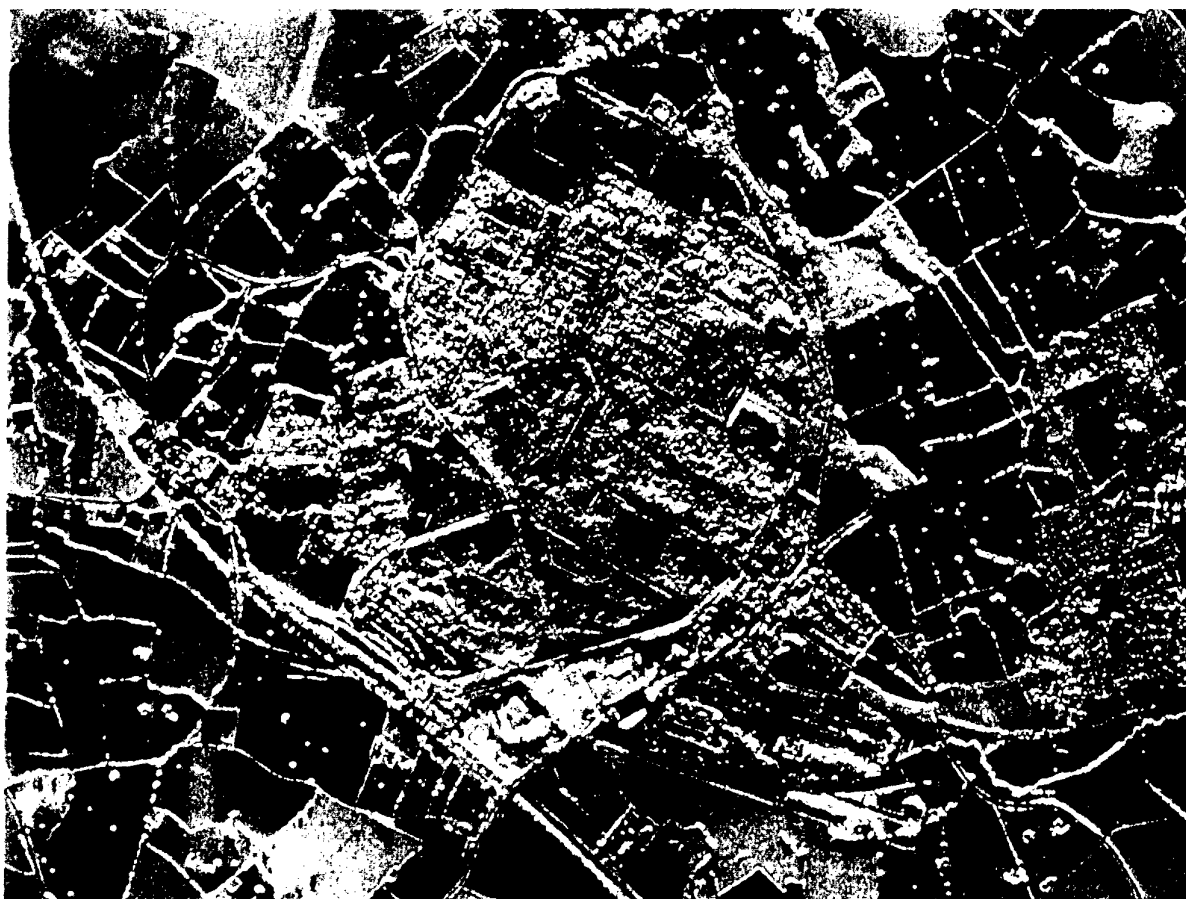
Bovengenoemde geselecteerde data sets zullen in het volgende hoofdstuk met verschillende presentatietechnieken worden weergegeven.



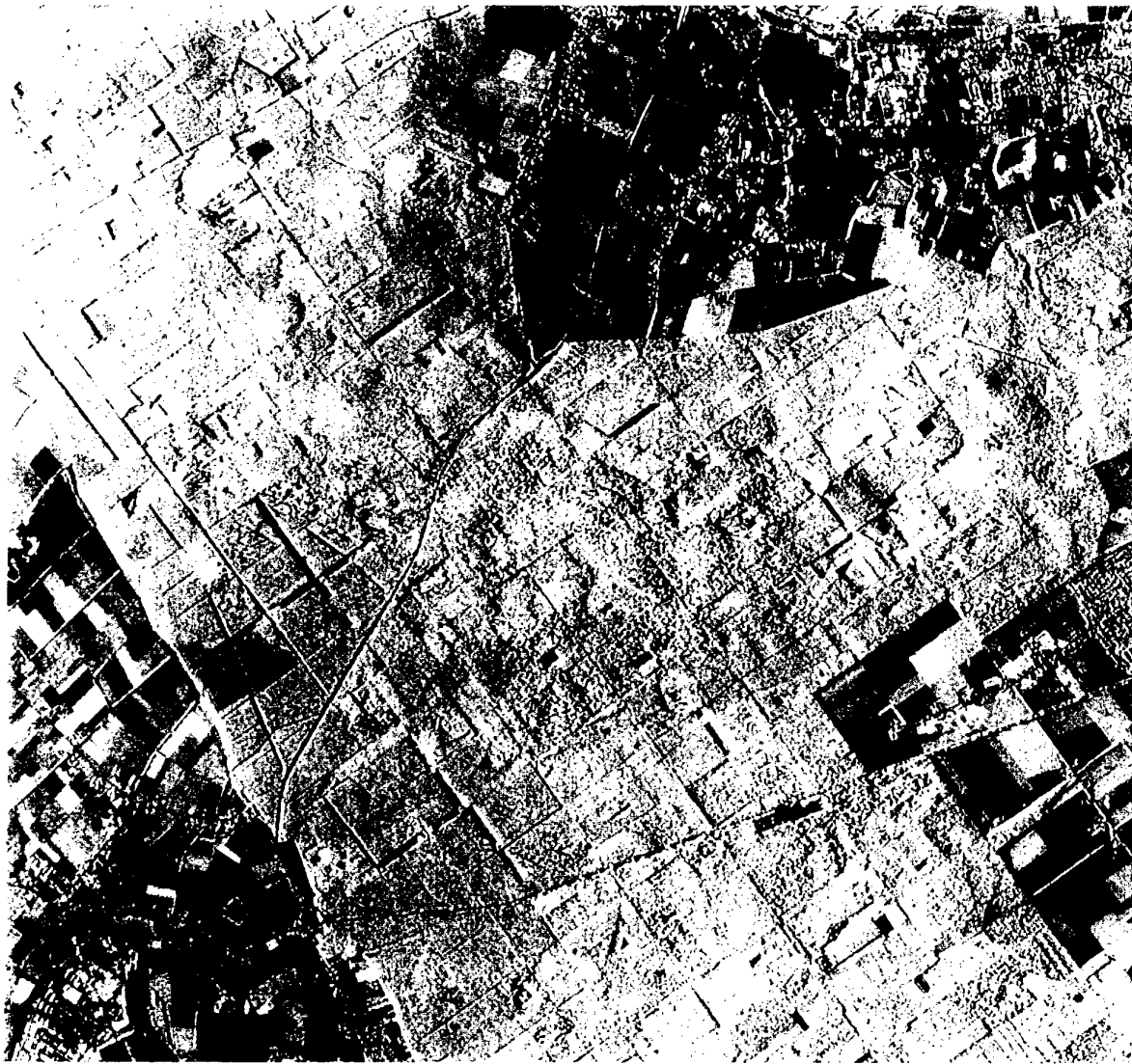
Figuur 3.1: Data set Amsterdam.



Figuur 3.2: Data set Amersfoort.



Figuur 3.3: Data set Swynnerton (PHARUS).



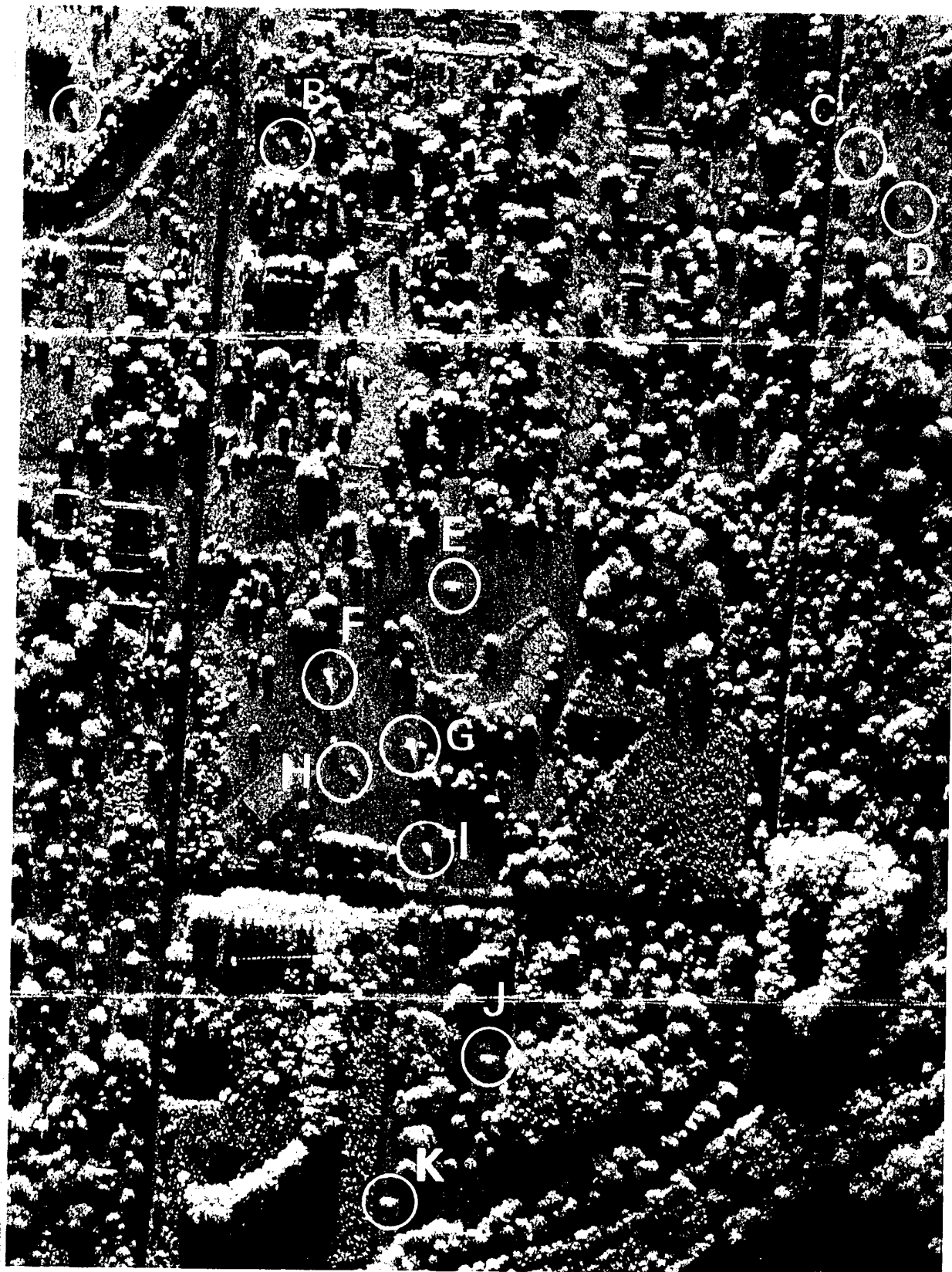
Figuur 3.4: Data set Reichswald.



Figuur 3.5: Data set Freiburg.



Figuur 3.6: Data set Heerde.



Figuur 3.7: Data set Swynnerton (RAMSES, ONERA).

4. Inventarisatie van presentatietechnieken

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden enkele presentatietechnieken besproken waarmee SAR beelden kunnen worden weergegeven. Een redelijk groot aantal technieken is geprobeerd, die echter niet allemaal in dit rapport zijn beschreven. Van deze technieken bleken namelijk de standaard manieren van beeldpresentatie het best aan de doelstellingen te voldoen, dat wil zeggen een duidelijke interpretatie van de terreinachtergrond en de doelen. Meer geavanceerde technieken zoals IHS-RGB (Intensity Hue Saturation) transformaties en CFAR (Constant False Alarm Rate) detectie bleken de beeldinhoud te veranderen en kunnen zo interpreteurs van SAR beelden op het verkeerde been zetten. Als voorbeeld, de meeste IHS-RGB transformaties veranderen de kleur van het beeld zodanig dat een onnatuurlijke indruk ontstaat die niet bevorderlijk is voor een duidelijke interpretatie. Bij CFAR detectie om doelen in een beeld aan te geven zullen false alarms, dat wil zeggen onterecht als doel gedetecteerde pixels, de interpreteur het idee geven dat er doelen zijn waar dit niet het geval is.

In dit hoofdstuk wordt de Heerde data set (terreinanalyse) weergegeven als grey tones beeld (verscheidene varianten), false colours beeld (verscheidene varianten), pseudo colours beeld, en als thematische kleuren beeld. De hoge resolutie Swynnerton opname van de ONERA SAR (doelopsporing) wordt weergegeven als grey tones beeld, al dan niet met de felle pixels opgeschaald, en als tweekanaals beeld waarbij het *HV* kanaal gesimuleerd is. Welke presentatietechnieken uiteindelijk zijn geselecteerd voor het terreinanalyse en doelopsporingsexperiment zal worden besproken in Sectie 4.4.

4.2 Terreinanalyse

4.2.1 Grey tones enkelkanaals beeld van *HH*

Figuur 4.1 geeft de opname met het *HH* polarisatiekanaal van de Heerde data set als grey tones beeld. Het *VV* kanaal geeft een vrijwel identiek beeld, omdat de *HH* en *VV* kanalen sterk radiometrisch gecorreleerd zijn. Het *HV* kanaal is over het algemeen 10 dB lager dan de overige twee kanalen. Het *HH* beeld in Figuur 4.1 is 2σ gestretcht om het contrast te optimaliseren. Deze procedure wordt ook wel histogram stretching [Gonzales 1993] genoemd omdat alle *HH* waarden in het beeld tussen de grenzen $\mu - 2\sigma$ en $\mu + 2\sigma$ in een grey tones range van 0-255 worden afgebeeld. Een grey tones waarde in het *HH* beeld wordt dus berekend volgens:

$$HH(0 - 255) = \frac{HH - (\mu - 2\sigma)}{4\sigma} * 255 \quad (4.1)$$

In bovenstaande vergelijking is μ het gemiddelde van de HH waarden (in dB) en σ de standaard afwijking van deze waarden, ook in dB. Alle pixels met een waarde kleiner dan $\mu - 2\sigma$ krijgen een grey tones waarde van 0, terwijl alle pixels met een waarde groter dan $\mu + 2\sigma$ op 255 worden afgebeeld.

In het beeld is duidelijk te zien dat van terreinsoorten met weinig textuur (glad oppervlak) een kleine reflectie terug wordt ontvangen in het HH polarisatiekanaal, evenals in de overige twee polarisatiekanalen (Sectie 3.2.1). Kale bodem velden zijn daarom donker gekleurd, terwijl water vrijwel geheel zwart is. Lage vegetatie en bos bezitten meer textuur, zodat de reflectie iets sterker is. In stedelijk gebied veroorzaken double-bounce effecten een sterke reflectie die voornamelijk HH en VV zal zijn. Merk op dat het beeld in Figuur 4.1 relatief veel speckle vertoont. Speckle kan worden onderdrukt door de drie polarimetrische kanalen op een bepaalde manier te combineren, hetgeen in de volgende sectie zal worden besproken.

4.2.2 Grey tones beeld van de PWF

Het Polarimetric Whitening Filter (PWF) heeft als doel dat het de drie polarisatiekanalen transformeert naar drie ongecorreleerde kanalen. Het PWF beeld is het gemiddelde van deze drie ongecorreleerde kanalen [Novak 1990]:

$$PWF = \frac{\text{tr}([\bar{C}]^{-1}[P])}{3} \quad (4.2)$$

Hierin is $\text{tr}()$ de trace van een matrix, $[P]$ de polarimetrische covariantie matrix in een pixel van het beeld, en $[\bar{C}]$ de gemiddelde polarimetrische covariantie matrix, exclusief de radardoorsnede σ_{HH} (zie (2.6)) zoals bepaald uit een groot aantal pixels in de omgeving van $[P]$. Als we azimuthale symmetrie veronderstellen zodat $\rho\sqrt{\gamma} = 1 - 2\varepsilon$ en als we tevens aannemen dat de HH en VV kanalen even groot zijn zodat $\gamma = 1$ [Nghiem 1992], dan kan de PWF geschreven worden als:

$$PWF = |HH|^2 + \frac{|HV|^2}{\varepsilon} + \frac{|VV - (1 - 2\varepsilon)HH|^2}{1 - (1 - 2\varepsilon)^2} \quad (4.3)$$

Omdat speckle spatieel ongecorreleerd is heeft de PWF de eigenschap dat het speckle vrijwel geheel onderdrukt door de drie kanalen te combineren. Dit is duidelijk te zien als we het PWF beeld van de Heerde data set in Figuur 4.2 vergelijken met het HH beeld in Figuur 4.1. In Figuur 4.2 is voor ε een waarde van 0.2 gekozen, dat wil zeggen dat er is aangenomen dat het HV kanaal 7 dB kleiner is dan het HH en VV kanaal.

4.2.3 False colours tweekanaals beeld (HH , HV)

In Figuur 4.3 is het tweekanaals beeld weergegeven van de Heerde data set. Het HH polarisatiekanaal is hier aangesloten op R en het HV kanaal op G (het blauwe kanaal is nul). Deze kleurstelling is gekozen omdat zonlicht voornamelijk bestaat uit rood en groentinten zodat het menselijk oog het gevoeligst is voor de kleuren rood en groen, dat wil zeggen dat het oog relatief weinig contrast kan waarnemen

in de kleur blauw. Omdat de kleuren in Figuur 4.3 niet overeenkomen met de werkelijke kleuren van de objecten noemen we zo'n beeld een false colours beeld. Vanwege het feit dat kleuren in SAR beelden kunstmatig worden opgewekt, zijn SAR beelden dus *per definitie* false colours beelden. De beide kleurkanalen in het beeld zijn onafhankelijk van elkaar 2σ gestretcht (zie (4.1)) om het contrast in het beeld te optimaliseren. Opmerkelijk is dat in het tweekanaals beeld de kale bodem velden veel duidelijker te onderscheiden zijn van lage vegetatie dan in het *HH* beeld en het PWF beeld. Dit komt doordat kale bodem velden een lage *HV* reflectie hebben. Het *HV* kanaal, dat vrijwel onafhankelijk is van het *HH* (en *VV*) kanaal, voegt zo een aanzienlijke hoeveelheid informatie toe aan het enkelkanaals beeld. Dit komt de interpretatie van de terreinachtergrond ten goede.

4.2.4 False colours driekanaals beeld (*HH*, *HV*, *VV*)

Een voor de hand liggende keuze om een polarimetrisch beeld weer te geven is het aansluiten van de drie polarisatiekanalen op de drie kleurkanalen. Zo wordt een driekanaals false colours beeld verkregen. Voor de Heerde data set is dit beeld reeds gegeven in Figuur 3.6 met *HH*=R, *HV*=G en *VV*=B. Als we Figuur 3.6 vergelijken met het tweekanaals beeld in Figuur 4.3, dan valt op dat het derde kanaal, dat wil zeggen *VV*, niet meer zoveel informatie toevoegt aan de *HH* en *HV* kanalen voor de interpretatie van het beeld. De reden is uiteraard dat *HH* en *VV* sterk radiometrisch gecorreleerd zijn. Indien we in het tweekanaals beeld *HH* op het blauwe kanaal hadden aangesloten in plaats van op het rode, dan is dezelfde conclusie geldig, zij het dan dat we minder goed contrast kunnen onderscheiden omdat het oog niet zo gevoelig is voor blauw.

4.2.5 False colours driekanaals beeld (*HH-VV*, *HV*, *HH+VV*)

Figuur 4.4 laat een soortgelijk false colours beeld zien als in Figuur 3.6, met dien verstande dat in Figuur 4.4 het verschil van de twee co-kanalen op het rode kleurenkanaal is aangesloten en de som van de twee co-kanalen op het blauwe kleurenkanaal. Het nut van de weergave zoals in Figuur 4.4 is dat het verschil en de som van de co-kanalen een indicatie geeft van het reflectiemechanisme van het terrein, maar met name van man-made objects zoals doelen en gebouwen. Het *verschil* van de co-kanalen is een maat voor *double bounce* reflecties omdat *HH* en *VV* na reflectie 180° uit fase zijn. De *som* van de co-kanalen is een maat voor *single bounce* reflecties omdat de co-kanalen na reflectie in fase zijn. Duidelijk te zien in Figuur 4.4 is dat kale bodem velden overwegend blauw gekleurd zijn, zodat zij een single bounce reflectiemechanisme hebben. De overwegend rode kleur van de stad Olst duidt erop dat in stedelijk gebied het double bounce reflectiemechanisme domineert. Deze reflecties kunnen afkomstig zijn van dihedral-vormige structuren gevormd door weg en muur (Sectie 3.2.1). Merk op dat de bosranden wit zijn, hetgeen erop duidt dat hier dihedral en trihedral reflecties even sterk aanwezig zijn.

Echter, omdat het beeld 2σ getretcht is, wordt de kleur op een bepaalde positie in het beeld beïnvloed door de verdeling van kleurwaarden over het gehele beeld.

Hierdoor kan het zijn dat de kleurtinten een verkeerde indruk geven over het reflectiemechanisme.

Om te onderzoeken of de kleurtinten in Figuur 4.4 een goede indicatie geven van het onderliggende reflectiemechanisme, is in Figuur 4.5 een uitvergroting van de stad Olst met omgeving weergegeven. Deze figuur is verkregen door op het rode kanaal het zogenaamde Dihedral Whitening Filter (DIWF) aan te sluiten en op zowel het groene als het blauwe kanaal het TRIhedral Whitening Filter (TRIWF). De DIWF en TRIWF filters zijn gedefinieerd als [Larson 1995]:

$$DIWF = \frac{|HH - VV|^2}{8\varepsilon} + \frac{|HV|^2}{2\varepsilon} \quad (4.4)$$

$$TRIWF = \frac{|HH + VV|^2}{4 - 4\varepsilon} \quad (4.5)$$

waarbij net als de PWF is gesteld dat $\rho\sqrt{\gamma}=1-2\varepsilon$ en $\sqrt{\gamma}=1$ en waarbij wederom voor ε de waarde 0.2 is gekozen. Omdat het DIWF filter is gebaseerd op het verschil van de co-kanalen (HV is 7 dB lager en draagt daardoor niet zoveel bij tot het DIWF) en het TRIWF op de som van deze kanalen, geeft Figuur 4.5 een soortgelijk beeld als Figuur 4.4, zij het dan dat het DIWF/TRIWF beeld nog sterker het reflectiemechanisme naar voren brengt. Double bounce reflecties kleuren dus rood en single bounce reflecties blauw/groen. Als ondergrens en bovengrens voor het stretchen zijn in Figuur 4.5 in plaats van $\mu-2\sigma$ en $\mu+2\sigma$ de waarden μ en $\mu+4\sigma$ gekozen. De mate van contrast is dus gelijk maar deze wordt gelegd bij de sterkere DIWF en TRIWF reflecties. Op deze manier kan in wat meer detail worden gekeken naar het reflectiemechanisme in de stad, van kale bodem velden, en aan bosranden. Duidelijk te zien is dat in de stad zowel double bounce als single bounce reflectiemechanismen aanwezig zijn. De posities waar deze mechanismen optreden zijn echter niet gecorreleerd met Figuur 4.4, zodat moet worden aangenomen dat de rode kleur in Figuur 4.4 inderdaad wordt veroorzaakt door het stretchen van het beeld. Het reflectiemechanisme van de kale bodem velden is echter wel dominant single bounce zoals de blauwe kleur in Figuur 4.5 laat zien. Aan bosranden komen single en double bounce mechanismen in gelijke mate voor zoals Figuur 4.5 laat zien.

4.2.6 Pseudo colours beeld van de PWF

Aan een grey tones (monochromatisch) beeld kan kleur worden toegekend op basis van de intensiteit in het pixel. Een beeld dat op deze manier is verkregen wordt een pseudo colours beeld genoemd. Figuur 4.6 laat het pseudo colours beeld zien van de PWF van Heerde. Het beeld is verkregen door aan de PWF waarden een kleurenschaal toe te kennen die loopt van blauw (pixels met een lage waarde) naar groen, geel, en tenslotte naar rood (pixels met een grote PWF waarde). Een nadeel van deze representatie is dat verschillende terreinsoorten dezelfde pseudo kleur krijgen doordat ze dezelfde PWF waarde hebben. Duidelijk te zien is dat stedelijk gebied en de voorkant van bos beide rood kleuren. Hetzelfde geldt voor water en

schaduw met betrekking tot de kleur blauw. Het afbeelden van verschillende terreinsoorten op dezelfde pseudo kleur zal de interpretatie van het SAR beeld uiteraard niet ten goede komen.

4.2.7 Thematische kleuren beeld

Een SAR beeld kan ook weergegeven worden in thematische kleuren. In het beeld worden dan een aantal terreinsoorten oftewel klassen gedefinieerd en voor iedere klasse wordt in een testgebied van een groot aantal pixels de gemiddelde polarimetrische covariantie matrix $[C]$ bepaald ook wel de klasse covariantie matrix genoemd (zie Sectie 2.5). De gemiddelde polarimetrische covariantie matrix van een klasse is karakteristiek voor die klasse en door in iedere pixel of groep van pixels de polarimetrische covariantie matrix met de klasse covariantie matrices te vergelijken kan met redelijke zekerheid (doorgaans 80% of beter) worden vastgesteld tot welke klasse het pixel behoort. Op classificatie algoritmen wordt hier niet nader ingegaan en wordt verwezen naar bijvoorbeeld [Lillesand 1987, van den Broek 1999].

In Figuur 4.7 is het geclassificeerde beeld weergegeven van de Heerde data set. Er zijn vijf klassen onderscheiden, te weten water (blauw), stad (rood), lage vegetatie (lichtgroen), bos (donkergroen) en kale bodem (bruin). Als zesde klasse is "schaduw" (grijs) ingevoerd voor de "informatie gaten" in het beeld, dat wil zeggen die pixels waarvan een te lage reflectie is verkregen. Het beeld is geclassificeerd in groepen van 6x6 pixels. Het classificatieresultaat is gefilterd, met behulp van een 3x3 majority filter, om geïsoleerde pixels te verwijderen. Het uiteindelijke resultaat na filteren is weer geëxpandeerd tot originele afmeting. Het indelen van het beeld in zes klassen betekent uiteraard dat er detail verloren gaat, met name wegen en kleine rivieren verdwijnen uit het beeld. Om dit detail weer terug te brengen zijn de thematische kleuren in Figuur 4.7 gemoduleerd met het PWF beeld. Dit betekent dat de RGB waarden in een pixel van het geclassificeerde beeld zijn geschaald tot R'G'B' met de PWF waarde in dat pixel:

$$\begin{pmatrix} R'(i) \\ G'(i) \\ B'(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(i) \\ G(i) \\ B(i) \end{pmatrix} * \left(\text{offset}(i) + \left(\frac{PWF - (\mu(i) - 2\sigma(i))}{4\sigma(i)} \right) * (255 - \text{offset}(i)) \right) \quad (4.6)$$

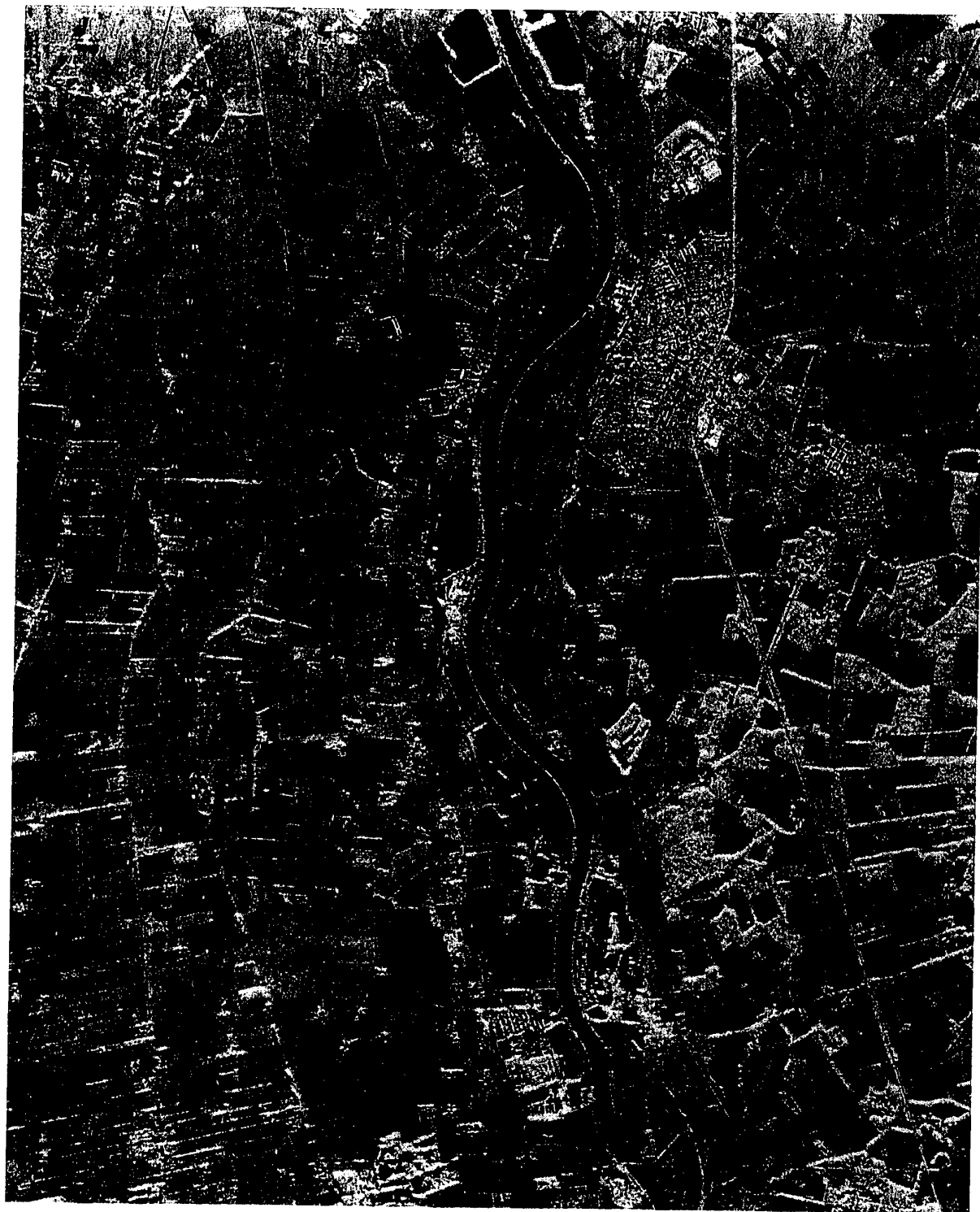
De notatie (i) refereert naar klasse i . Zoals (4.6) laat zien zijn de PWF waarden binnen een thematische kleur 2σ gestretcht om het contrast te optimaliseren. Merk op dat zowel R, G, als B in een pixel met dezelfde factor worden geschaald. Hierdoor verandert de intensiteit maar blijft de kleur gelijk. De offset dient ervoor dat pixels met een kleine PWF waarde niet zwart worden gekleurd. Alle klassen hebben daarom een offset van 64 gekregen, hetgeen een kwart is van de 0-255 schaal. Uitzonderingen zijn lage vegetatie en stad. De eerste heeft een offset van 128 gekregen zodat lage vegetatie een felle kleur groen krijgt dan bos. De tweede heeft een offset van 224 gekregen zodat stedelijk gebied fel rood kleurt in het beeld. Vergelijken van Figuur 4.7 en Figuur 3.6 laat zien dat in stedelijk gebied misclassificatie optreedt in die zin dat gebouwen met een minder sterke reflectie als bos worden geclassificeerd.



Figuur 4.1: Grey tones enkelkanaals beeld van HH.



Figuur 4.2: Grey tones beeld van de PWF.



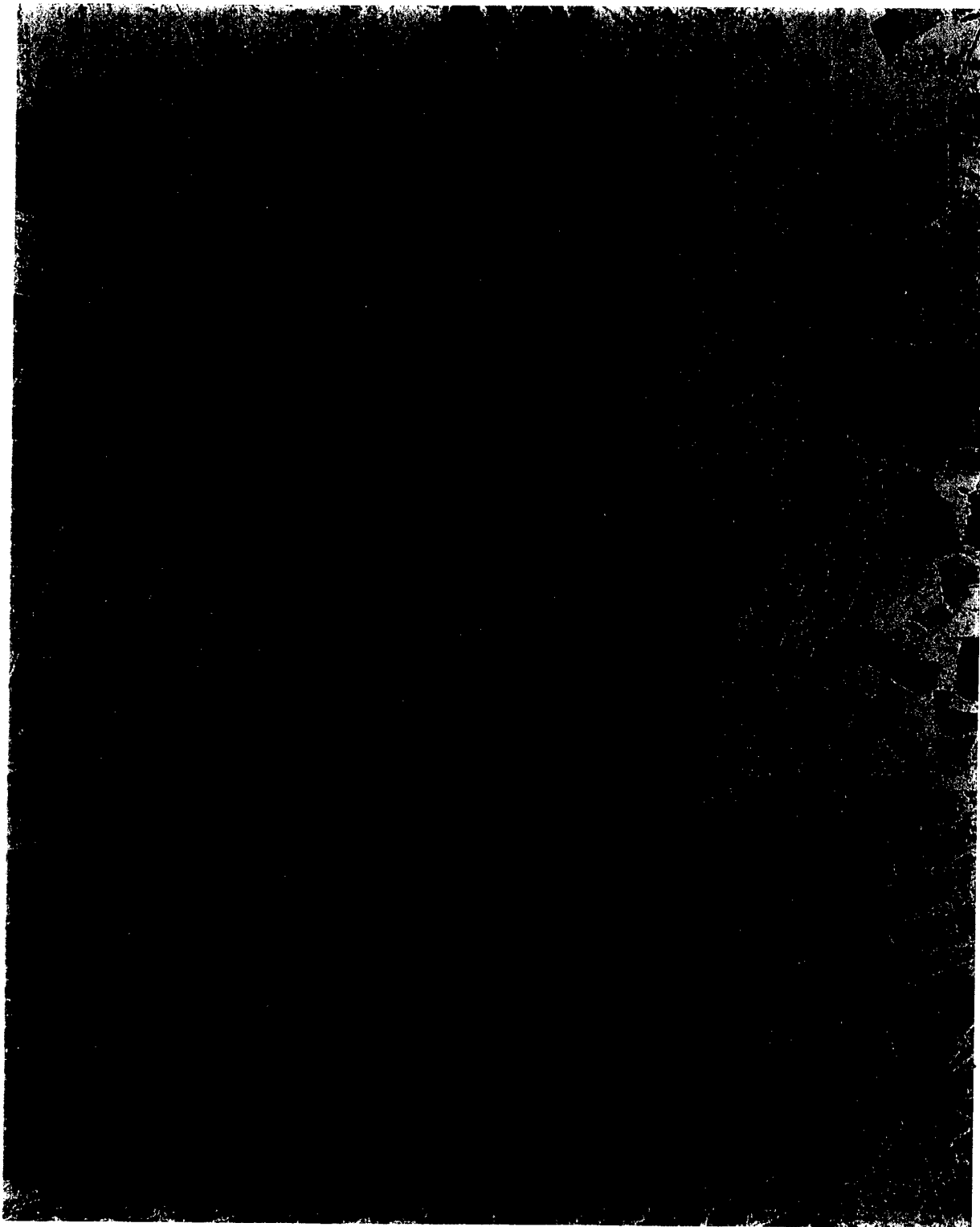
Figuur 4.3: False colours tweekanaals beeld, $R=HH, G=HV$.



Figuur 4.4: False colours driekanaals beeld, $R=HH-VV$, $G=HV$, $B=HH+VV$.



Figuur 4.5: False colours Dihedral Whitening Filter/Trihedral Whitening Filter (DIWF/TRIWF) beeld van de stad Olst en omgeving. $R=DIWF$, $G=B=TRIWF$.



Figuur 4.6: Pseudo colours beeld van de PWF.



Figuur 4.7: Thematische kleuren beeld. Lichtgroen=lage vegetatie, donkergroen=bos, bruin=kale bodem, blauw=water, rood=stad, en grijs=schaduw. De kleur van ieder klasse is gemoduleerd met de PWF.

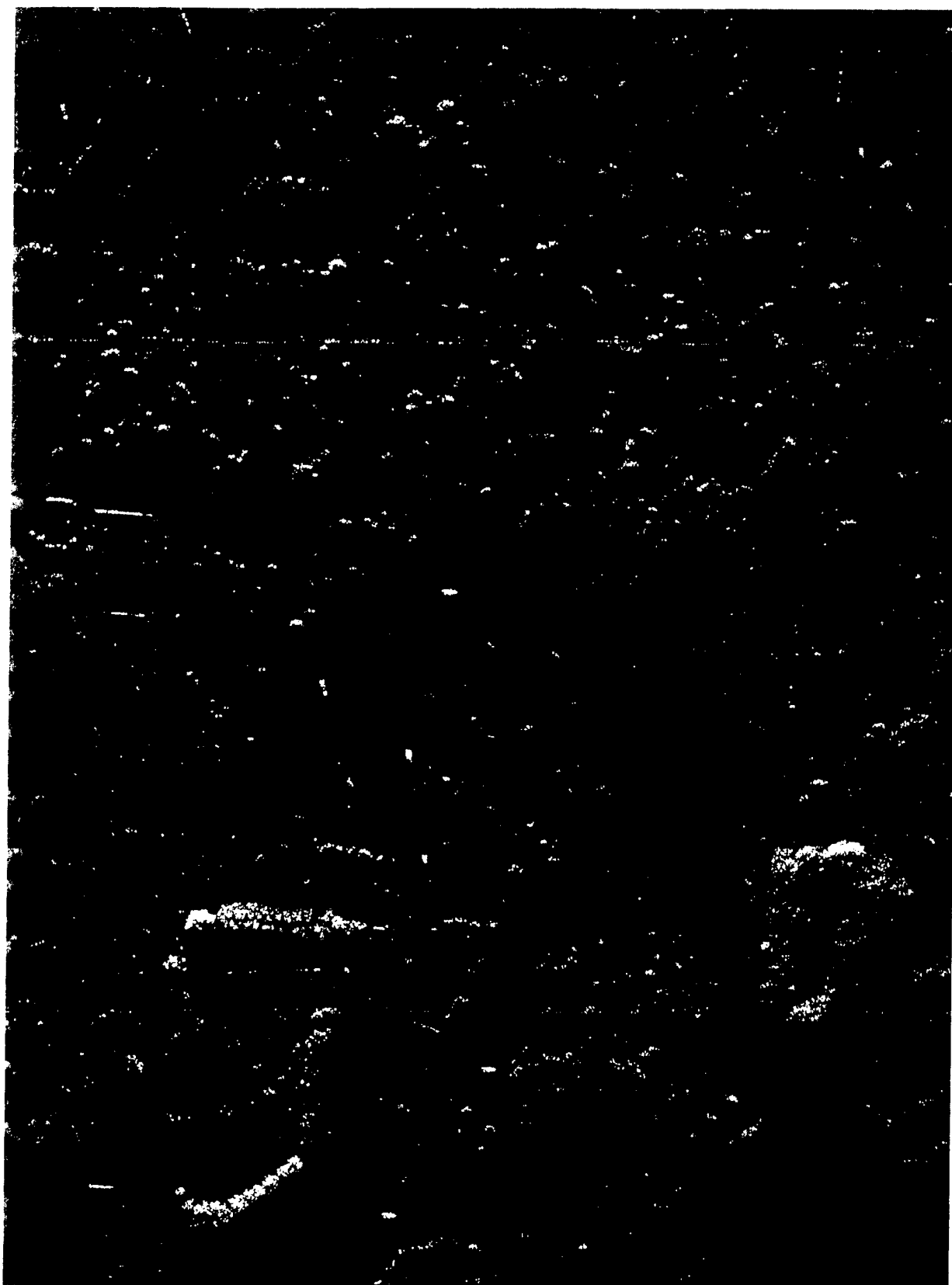
4.3 Doelopsporing

4.3.1 Grey tones enkelkanaals beeld van VV

Het grey tones VV beeld van het Swynnerton gebied is reeds in Sectie 3.3.1 besproken. Op het betreffende beeld in Figuur 3.7 is 2σ stretching toegepast om zo het contrast te optimaliseren. Duidelijk is te zien dat door het stretchen de sterke reflecties worden benadrukt. Deze sterke reflecties zijn echter niet alleen afkomstig van de militaire voertuigen maar ook van de voorkant van bos (zie ook Sectie 3.2.3).

4.3.2 Geschaald grey tones enkelkanaals beeld van VV

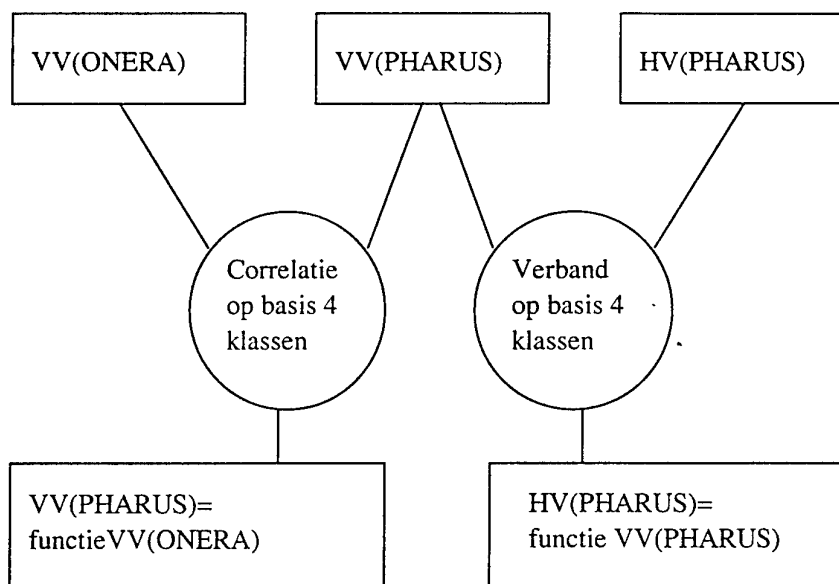
Een andere manier om het contrast in het Swynnerton VV beeld te optimaliseren is het opschalen van de felle reflecties. In Figuur 4.8 is bijvoorbeeld gekozen om aan alle pixels met een waarde groter dan 170 een waarde van 85 toe te voegen met als bovengrens uiteraard 255. Evenals Figuur 3.7 is te zien dat het versterken van het contrast ook invloed heeft op de bosranden.



Figuur 4.8: Geschaald grey tones enkelkanaals beeld van VV.

4.3.3 Gesimuleerd false colours tweekanaals beeld (*HV*, *VV*)

Om de meerwaarde te bekijken van een tweede kanaal in verband met doelopsparing is een *HV* beeld gesimuleerd voor de Swynnerton opname van de ONERA SAR. Door het *VV* kanaal aan te sluiten op R en het *HV* kanaal op G zou dan een soortgelijk beeld als in Figuur 4.3 kunnen worden verkregen. De doorlopen procedure om het gesimuleerde beeld te verkrijgen is in Figuur 4.9 weergegeven en zal hier nader worden toegelicht.

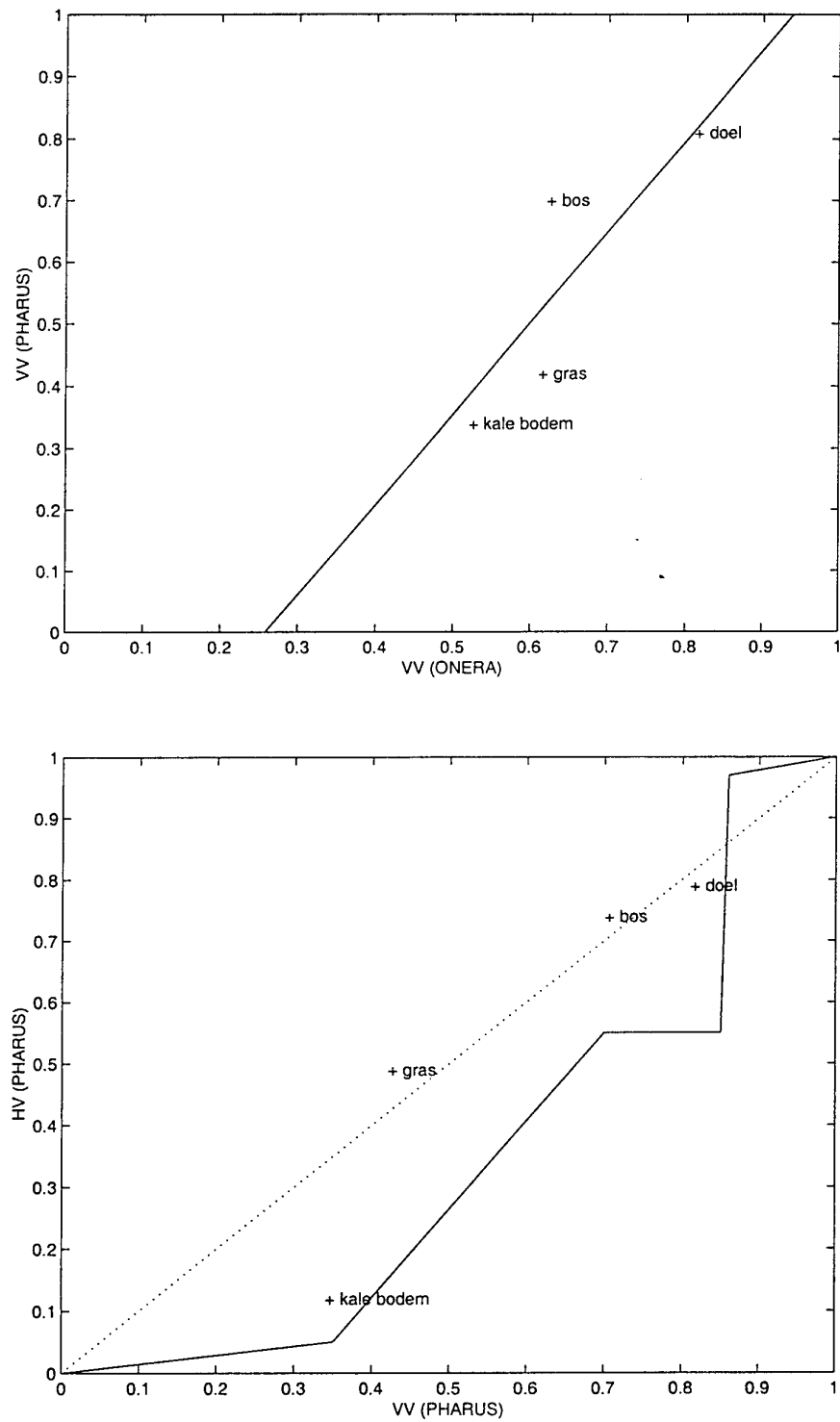


Figuur 4.9: Procedure voor het simuleren van een tweekanaals (*HV*, *VV*) beeld voor de ONERA opname van Swynnerton.

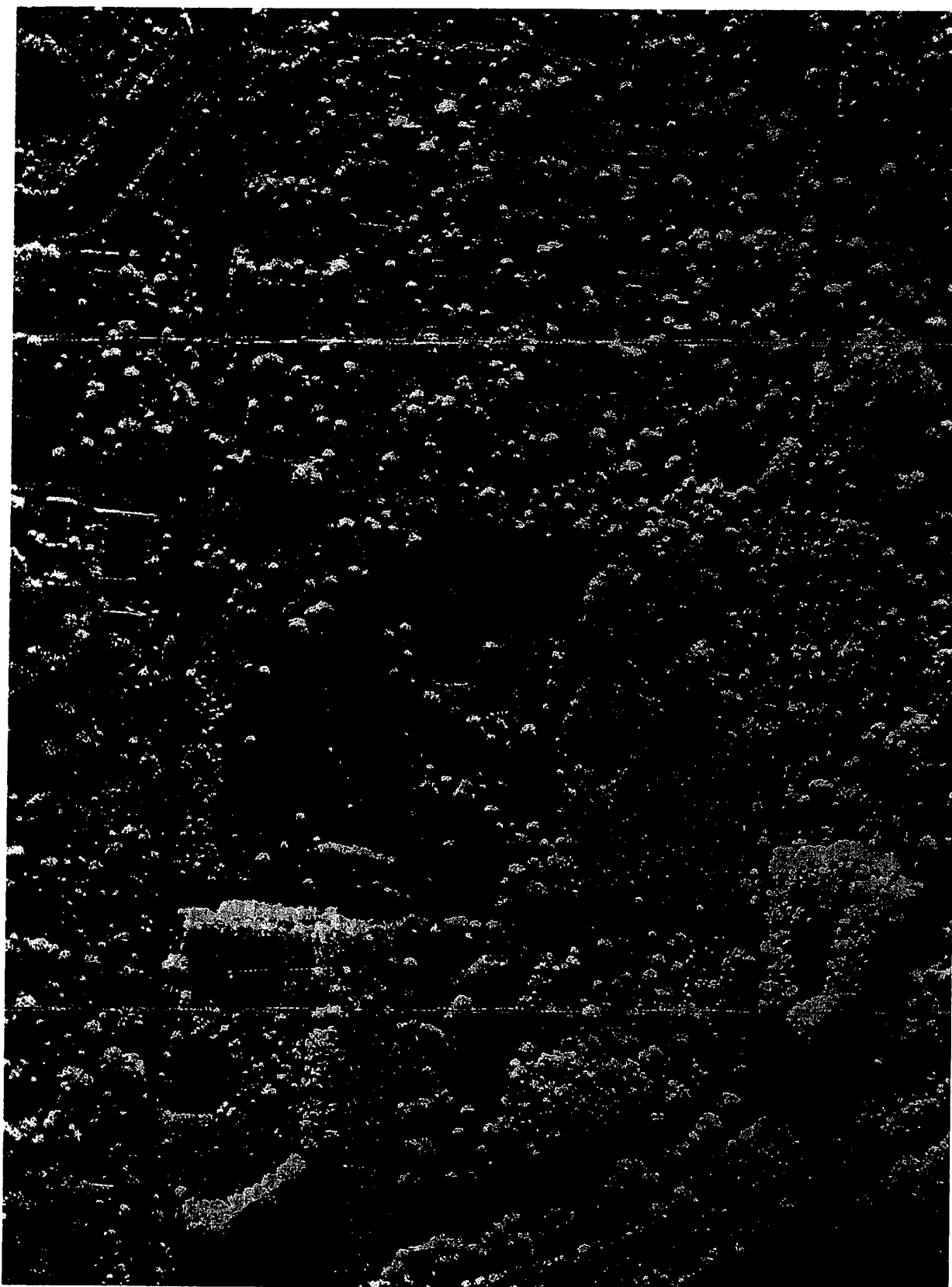
Om het *HV* kanaal te simuleren is voor de vier klassen die we in het ONERA beeld van Swynnerton beeld kunnen onderscheiden (lage vegetatie, bos, kale bodem en doelen) het gemiddelde van het *VV* kanaal bepaald (in dB) uit testgebieden die karakteristiek zijn voor die klassen. Voor dezelfde klassen is dit gedaan in de Heerde opname van PHARUS (voor doelen zijn gebouwen geselecteerd), zij het dan dat bij deze opname zowel de *HV* als de *VV* waarden voor de klassen zijn bepaald. Het verband (correlatie) tussen de *VV* waarden van beide opnamen is weergegeven in de bovenste plot van Figuur 4.10. Op de horizontale as staan de *VV* waarden van het Swynnerton beeld (ONERA opname) en op de verticale as die van het Heerde beeld (PHARUS opname). Op beide assen zijn de *VV* waarden weergegeven als kleurindices. Omdat op beide beelden 2σ stretching is toegepast zijn de kleurindices gegeven door (4.1), maar dan in een bereik van 0 tot 1, dus niet vermenigvuldigd met 255. Op de *VV* waarden van beide beelden is een lineaire regressie toegepast waaruit de lijnvergelijking $VV(\text{PHARUS}) = -0.38 + 1.47 VV(\text{ONERA})$ is verkregen. Het feit dat de coëfficiënten van deze lineaire vergelijking niet gelijk zijn aan 0 (maar -0.38) en 1 (maar 1.47) kan worden verklaard doordat de beide SAR's met verschillende hoeken hebben ingekeken, bij verschillende golflengte opereren, en doordat de

beelden niet absoluut gecalibreerd zijn. Het laatste heeft tot gevolg dat een zelfde reflectie met verschillende sterkte in de beide beelden wordt weergegeven. In de onderste plot van Figuur 4.10 zijn de HV en VV waarden voor de vier genoemde klassen uit de Heerde opname weergegeven. De diagonaal in deze figuur geeft de verzameling van punten aan met gelijke R en G waarde. Als we nu stellen dat $VV=R$ en $HV=G$ en deze lijn langslopen van $(R,G)=(0,0)$ naar $(R,G)=(1,1)$ dan krijgen we de kleuren zwart $(0,0, B=0)$, okergeel $(0.5,0.5, B=0)$, en uiteindelijk geel $(1,1, B=0)$. Duidelijk te zien is dat kale bodem een beduidend hogere R dan G waarde heeft, hetgeen de bruine kleur van de kale bodem velden in Figuur 4.3 verklaart. Gras heeft een (R,G) waarde van ongeveer $(0.5,0.5)$ en kleurt daarom geel/groen, terwijl bos een waarde heeft van $(0.7,0.7)$ waardoor het een gele kleur heeft in Figuur 4.3. Voor het gesimuleerde beeld moet het dus mogelijk zijn om de kleuren bruin (kale bodem), geel/groen (gras) en geel (bos) van elkaar te scheiden. Na enig proberen bleek de getrokken lijn in de onderste plot van Figuur 4.10 dit onderscheid aan kleuren op te leveren in het gesimuleerde ONERA tweekanaals beeld. Bij iedere VV waarde in het ONERA beeld werd dus via de bovenstaande lijnvergelijking de corresponderende VV waarde in het Heerde beeld bepaald. Bij deze VV waarde uit het Heerde beeld werd dan de HV waarde gekozen die op de getrokken lijn in de onderste plot van Figuur 4.10 ligt. Deze HV waarde werd dan gebruikt om het HV kanaal voor het ONERA beeld te simuleren. Voor een gedetailleerde weergave van de militaire doelen in het gesimuleerde beeld is met behulp van een random generator een gele of rode kleur aan de pixels in het doel met een VV waarde groter dan 200 toegekend. Het aanbrengen van felle rode pixels in de doelen wordt gerechtvaardigd door het optreden van double bounce reflecties.

Het resultaat van het gesimuleerde tweekanaals beeld is te zien in Figuur 4.11. Duidelijk is te zien dat de doelstelling is bereikt, dat wil zeggen we kunnen onderscheid maken tussen de kleuren bruin, groen/geel en geel. Echter, het is ook duidelijk dat het gesimuleerde beeld meer van een pseudo kleuren beeld (Figuur 4.6) weg heeft dan van een tweekanaals false colours beeld zoals in Figuur 4.3. Dit komt doordat de speckle in Figuur 4.3 niet gesimuleerd kan worden. Speckle in een beeld heeft tot gevolg dat bij een R waarde (VV) meerdere G waarden (HV) kunnen behoren. Dit is duidelijk te zien in de grasvelden van Figuur 4.3 die een korrelig groen/gele structuur hebben. In het gesimuleerde beeld is aan iedere R waarde één G waarde toegekend waardoor het gesimuleerde HV kanaal sterk gecorreleerd is met het VV kanaal. Dit verklaart de indruk van een pseudo kleuren beeld. Uiteraard kon dit van tevoren worden verwacht. Het nut van deze simulatie is dan ook om een beeld te *construeren* waarin bovenstaande kleurscheiding is aangebracht. Een *reconstructie* van het Heerde beeld is niet als doelstelling voor ogen gehouden.



Figuur 4.10: Boven: verband tussen de VV waarden uit de Swynnerton (ONERA) en Heerde (PHARUS) opnamen. Onder: aangebrachte verband tussen de HV en VV waarden uit de Heerde opname voor het simuleren van het HV kanaal voor de Swynnerton opname.



Figuur 4.11: Gesimuleerd false colours tweekanaals beeld, $R=VV, G=HV$.

4.4 Geselecteerde presentatietechnieken voor terreinanalyse en doelopsporingsexperimenten

In deze sectie wordt kort toegelicht welke presentatietechnieken zijn geselecteerd voor het terreinanalyse-experiment en het doelopsporingsexperiment.

Voor het terreinanalyseproefpersoonexperiment met de Heerde data set zijn de volgende presentatietechnieken geselecteerd. Het grey tones *HH* beeld (Sectie 4.2.1), het grey tones PWF beeld (Sectie 4.2.2), het false colours tweekanaals beeld (Sectie 4.2.3), en het false colours driekanaals beeld van de *HH*, *HV* en *VV* kanalen (Sectie 4.2.4). In plaats van het *HH*, *HV*, *VV* beeld had ook het false colours *HH-VV*, *HV*, *HH+VV* beeld gekozen kunnen worden omdat beide driekanaals beelden vrijwel identiek te interpreteren zijn. Het pseudo colours beeld van de PWF en het thematische kleurenbeeld zijn minder geschikt bevonden als presentatie van SAR beelden. De reden om het pseudo colours beeld weg te laten is dat verschillende terreinsoorten met gelijke intensiteit op dezelfde kleur worden afgebeeld. Het thematische kleurenbeeld op zich is een uitstekende manier om een SAR beeld weer te geven, zij het dat er in geringe mate misclassificaties kunnen optreden. Echter, een wezenlijk onderdeel van de proefpersoonexperimenten wordt gevormd door beeldsegmentatie (Hoofdstuk 5), dat wil zeggen dat de proefpersonen de terreinklassen in het beeld moeten benoemen. In het thematische kleurenbeeld zijn deze al aangegeven zodat het beeld ongeschikt is voor het experiment.

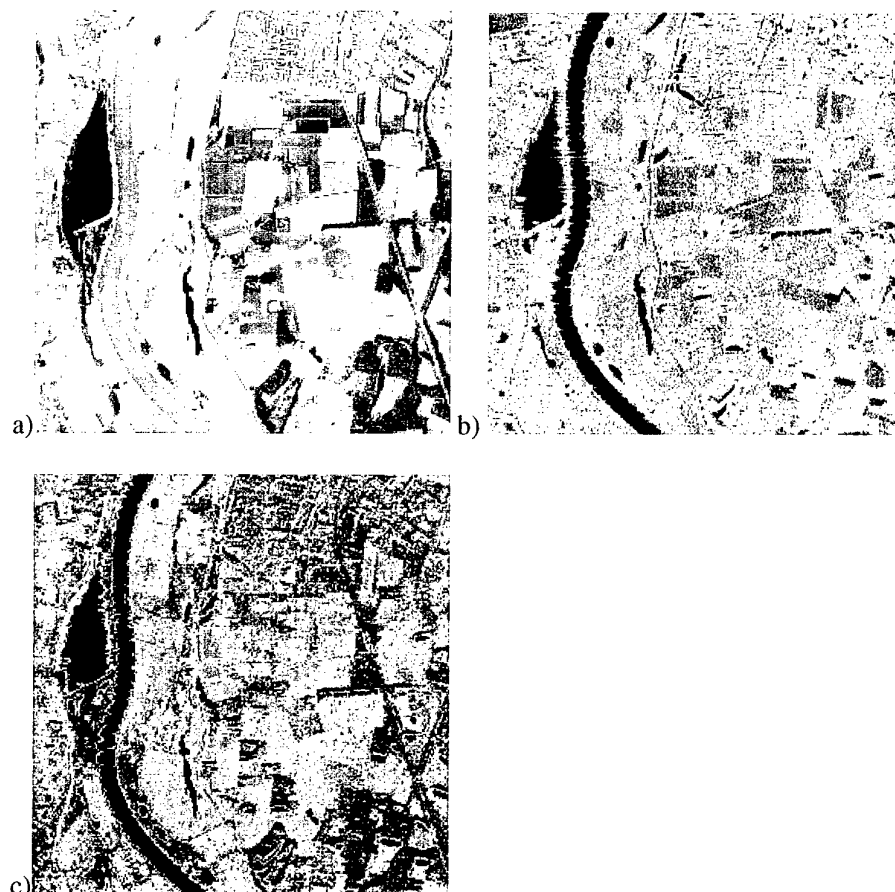
Door een enkelkanaals, een tweekanaals en een driekanaals beeld in het experiment op te nemen kan worden bekeken wat een extra kanaal bijdraagt aan de interpretatie van SAR beelden. Een volledig polarimetrische SAR (drie kanalen) is een complex apparaat en daardoor relatief duur. Indien met twee kanalen de vijf terreinsoorten goed van elkaar te onderscheiden zijn dan zou, vooral met oog op militaire toepassingen, een tweekanaals SAR een alternatief kunnen bieden voor een enkelkanaals hoge resolutie SAR. Het PWF beeld is meegenomen om het effect van speckle op de interpretatie te bekijken.

Voor het doelopsporingsexperiment met de Swynnerton data set van ONERA zijn de presentatietechnieken geselecteerd die zijn beschreven in Sectie 4.3, dat wil zeggen het 2σ gestretchte grey tones enkelkanaals *VV* beeld, het grey tones enkelkanaals *VV* beeld met opgeschaalde sterke reflecties, en het false colours tweekanaals *HV*, *VV* beeld waarbij het *HV* kanaal is gesimuleerd. Het opschalen van sterke reflecties dient als alternatief voor het stretchen van het beeld en met een tweekanaals beeld kan de meerwaarde van een extra kanaal worden onderzocht ten opzichte van een enkelkanaals SAR ten behoeve van doelopsporing.

5. Terreinanalyse-experiment

5.1 Voorstudie

Om enig inzicht te verkrijgen in de interpretatie van SAR beelden is een kleine voorstudie gedaan met betrekking tot de afbeelding van een SAR beeld naar een optisch beeld. Zoals besproken is de standaard manier van weergeven van SAR beelden het afbeelden van de *HH*, *HV* en *VV* kanalen op respectievelijk de rode, groene en blauwe kleurkanalen. Hiermee wordt de interpretatie van deze beelden in eerste instantie aangeleerd. Het is op voorhand niet duidelijk of deze representatie wel optimaal is. Aangezien optische luchtfoto's gemakkelijker interpreteerbaar zijn dan de SAR beelden is het verstandig om niet de afbeelding van de drie kanalen op het rood, groen en blauw kanaal zonder meer te gebruiken, maar om te onderzoeken of er een afbeelding bestaat die een SAR beeld het aanzien geeft van een optisch beeld. Dit zou als voordeel hebben dat de interpretatie van SAR beelden niet langer apart hoeft te worden aangeleerd. In de voorstudie is geëvalueerd of er een zinvolle afbeelding te vinden is tussen SAR en optische data. Het blijkt echter dat er voor bijna alle (*HH*, *HV*, *VV*) waarden vele verschillende (R, G, B) waarden mogelijk zijn. Bijvoorbeeld, een metalen voorwerp levert een sterke respons in elk polarisatiekanaal van de SAR maar kan indien geleverd elke willekeurige optische kleur hebben. Hierdoor is het niet mogelijk om een gedetailleerde afbeelding tussen SAR en optische data te bepalen. Figuur 5.1c geeft de best mogelijke "natuurlijk" gevonden afbeelding van een SAR beeld (Figuur 5.1b) naar een optisch beeld (Figuur 5.1a). Bij deze afbeelding is de gemiddelde referentie (R, G, B) kleur van alle identieke (*HH*, *HV*, *VV*) waarden genomen. Bij de afbeelding van (*HH*, *HV*, *VV*) naar (R, G, B) zijn de kleuren veel natuurlijker en is interpretatie van het beeld gemakkelijker, maar is veel detail verloren gegaan van de SAR data, doordat verschillende (*HH*, *HV*, *VV*) waarden op dezelfde (R, G, B) kleur zijn afgebeeld. Dit laatste is bij detectie en herkenningstaken niet wenselijk. In Figuur 5.1c zijn bijvoorbeeld bepaalde wegen bijna niet meer waar te nemen en zijn de duidelijke contouren verdwenen. Door deze afbeelding te gebruiken is het beeld weliswaar voor ongetrainde waarnemers gemakkelijker te segmenteren, maar is het moeilijker om details in het beeld waar te nemen. Wel bevestigt deze voorstudie dat SAR data grofweg in de zes klassen uiteenvalt van Sectie 4.2.7. Deze klassen zijn al eerder experimenteel vastgesteld in [van den Broek 1999].



Figuur 5.1: a) "Optisch" beeld. De data in dit beeld bevat een infrarood, rood en groen kanaal. Om deze data te kunnen visualiseren is het infrarood kanaal aangepast en in het blauw kanaal verwerkt. Hierdoor zijn de tinten enigszins paars. b) Driekanaals (polarimetrisch) SAR beeld. c) Het SAR beeld waarbij de kleuren van de corresponderende posities in a) en b) zijn gebruikt om een afbeelding te krijgen.

5.2 Beschrijving en uitvoering van het experiment

De in Sectie 4.4 geselecteerde presentatietechnieken zijn hier gebruikt in een terreinanalyse-experiment met proefpersonen. Het betreft dus:

- het grey tones *HH* beeld
- het grey tones PWF beeld
- het false colours (*HH*, *HV*) tweekanaals beeld
- en het false colours (*HH*, *HV*, *VV*) driekanaals beeld

Als proefpersonen fungeren ongetrainde waarnemers. Voor bovengenoemde representaties zijn respectievelijk 11, 13, 12 en 11 proefpersonen gebruikt. Het doel van het terreinanalyse-experiment is te bepalen welk van de vier presentatietechnieken het meest geschikt is voor terreinanalyse, d.w.z. voor het

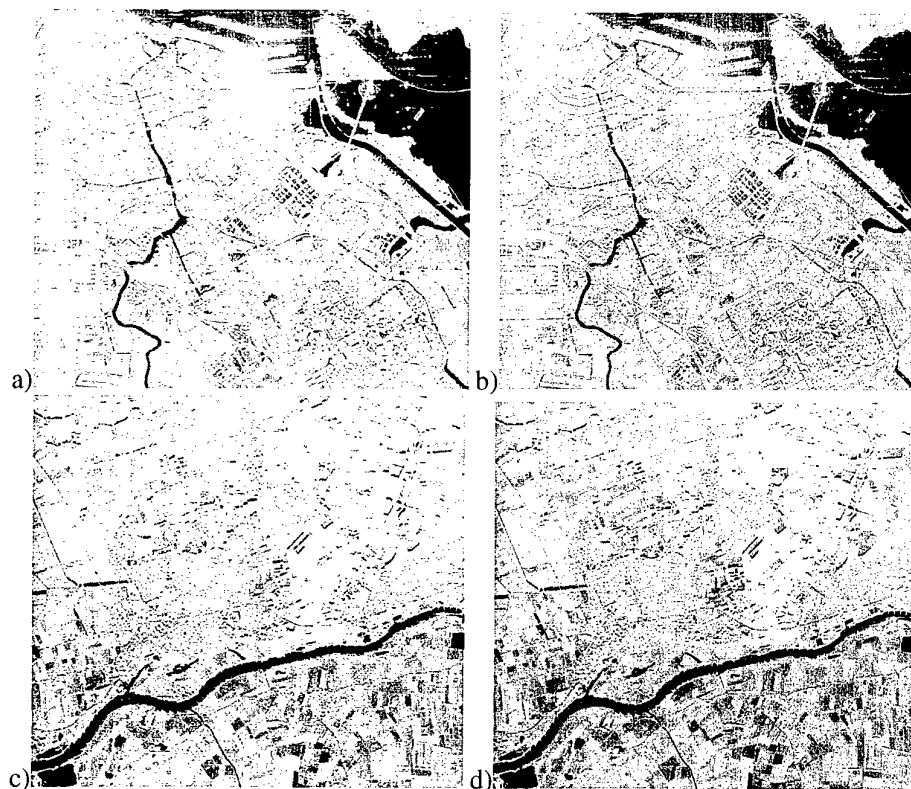
interpreteren van de terreinachtergrond. Hiertoe moeten door de proefpersonen realistische taken worden uitgevoerd met betrekking tot terreinanalyse. Er worden experimenten verricht waarbij proefpersonen segmentatie- en herkenningstaken moeten uitvoeren. Uit de analyse van de uitkomsten van deze experimenten volgt welke karakteristieke aspecten van de beelden bepalend zijn voor de taakprestatie van de waarnemer en hoe SAR beelden optimaal kunnen worden weergegeven. De resultaten van dit project zijn ook bruikbaar voor het project CERISE II, dat voorzien is bij TNO-FEL en TNO-TM. Het betreft hier de simulatie van onder andere SAR beelden, die worden weergegeven voor onder meer trainingsdoeleinden. Voor alle duidelijkheid: het huidige project betreft het bepalen van de beste weergave van opgenomen SAR beelden voor visuele doelherkenning. Parallel aan dit onderzoek, waarin de visuele doelherkenning centraal staat, vindt bij TNO-FEL ook onderzoek plaats naar computergeassisteerde doelherkenning.

Omdat er vanwege detailverlies (Sectie 5.1) geen afbeelding van SAR naar optische kleuren wordt gebruikt, dient een proefpersoon eerst een leerfase te hebben gehad (Sectie 5.2.1), alvorens kan worden begonnen met het feitelijke experiment. In het experiment voor de terreinanalyse van SAR beelden worden twee soorten taken onderscheiden: segmentatie en het markeren van gebouwen. Segmentatie heeft betrekking op het interpreteren van terreinsoorten in de terreinachtergrond. Markeren van gebouwen heeft betrekking op interpretatie van grote objecten in de terreinachtergrond. Beide taken stellen specifieke eisen aan de beeldrepresentatie. Bij segmentatie is namelijk de correcte globale classificatie van het beeld van belang, terwijl bij het markeren van gebouwen de mate van detail en opvallendheid van de gebouwen belangrijk is. Segmentatie en het markeren van de gebouwen worden nader gespecificeerd in respectievelijk Sectie 5.2.2 en Sectie 5.2.3.

5.2.1 Leerfase

In de leerfase krijgen de proefpersonen een viertal SAR beelden zien, twee opnamen van Amsterdam en twee van Wageningen, om vertrouwd te raken met de SAR beelden (zie Figuur 5.2). Er wordt verteld dat een dergelijk beeld ruwweg kan worden onderverdeeld in zes klassen: water, gebouwen, gras, bos, kale bodem en schaduwgebieden, en dat deze er in het SAR (grey tones of kleuren representatie) beeld als volgt uitzien:

- water is zwart
- gebouwen zijn helder (wit of rood/blauw)
- gras heeft een lichte kleur (lichte grijs tint of groen/bruin)
- bos is helder met textuur
- de voorkant van een bos is helder
- kale bodem is donker (donkere grijs tint of paars)
- verticale objecten werpen schaduwen

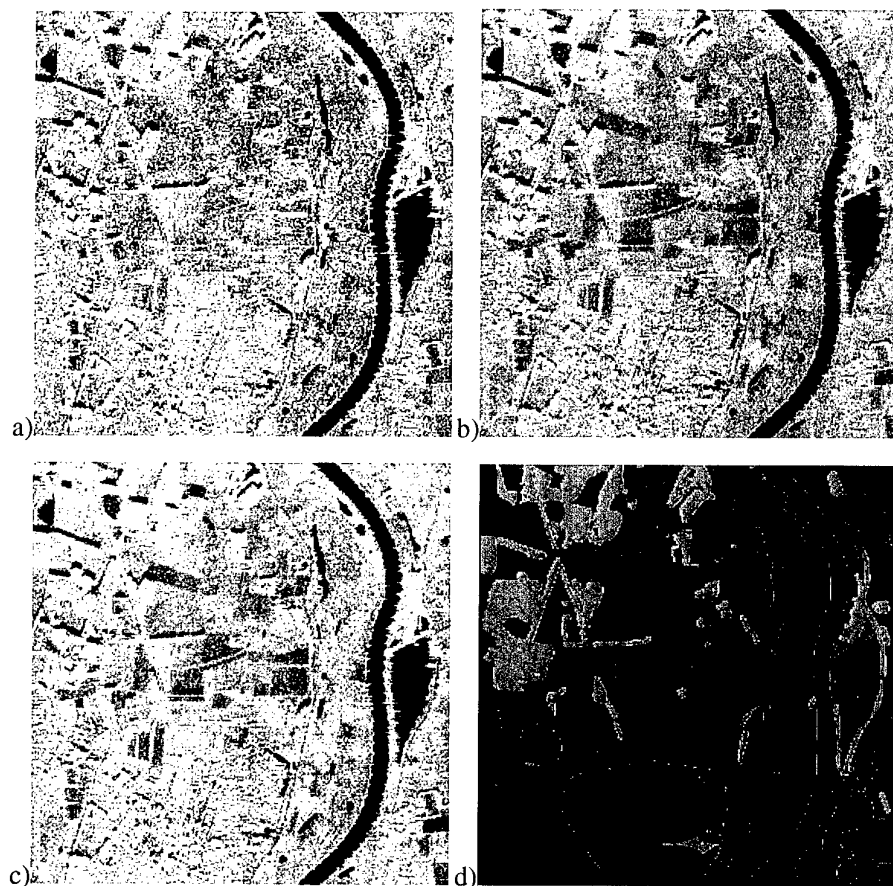


Figuur 5.2: SAR beelden die worden gebruikt tijdens de leerfase. a, b) Amsterdam en c, d) Wageningen. In de linker kolom zijn de enkelkanaals PWF beelden en de rechter kolom zijn de driekanaals polarimetrische beelden weergegeven.

5.2.2 Segmentatie

De in het experiment gebruikte type digitale beelden (Figuur 5.3) zijn een deel van de Heerde beelden met gevarieerd terrein (Sectie 4.2), waarvan nauwkeurig bekend is wat elk pixel voorstelt (groundtruth). Met andere woorden, van elk pixel is bekend welke terreinsoort het representeert.

De proefpersoon krijgt zo'n digitaal beeld aangeboden in het digitale beeldbewerkingsprogramma *Adobe Photoshop*, tezamen met een kleurenpalet en een digitale kwast (waarvan de grootte valt in te stellen). Het kleurenpalet representeert een soort legenda waarin alle verschillende objecten en terreinsoorten die in de scène kunnen voorkomen staan afgebeeld. De proefpersoon kan na het aanklikken van een paletvakje met de digitale kwast in (een transparante overlay) het beeld aangeven waar de gekozen terreinsoort voorkomt in de scène.



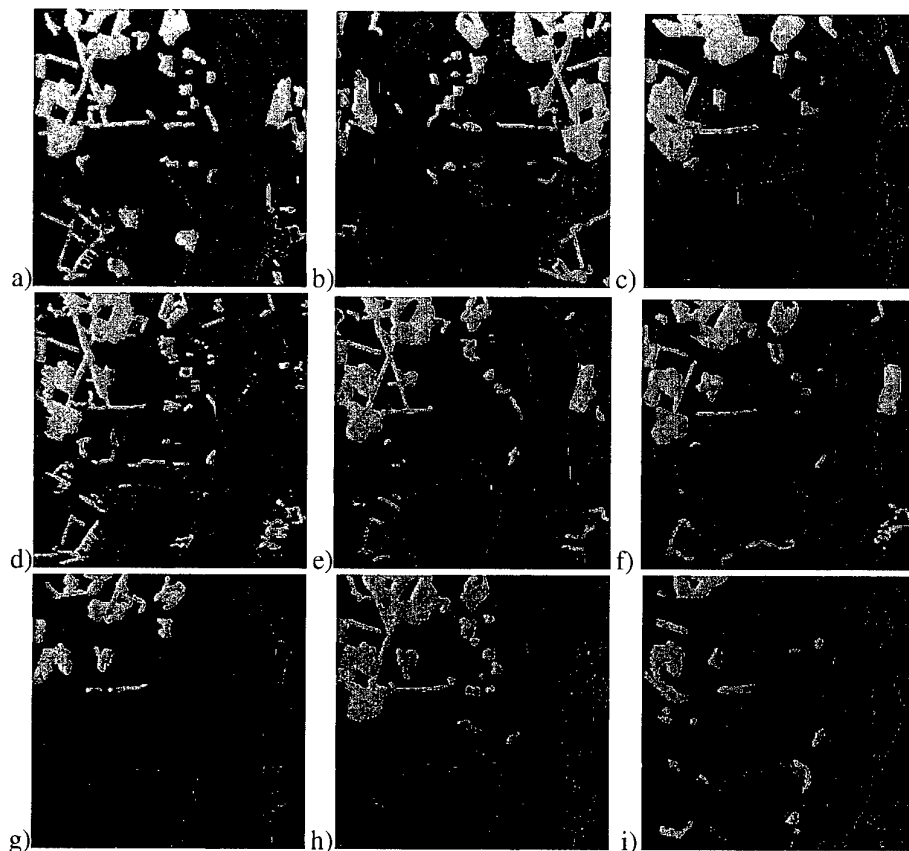
*Figuur 5.3: Beelden van dezelfde scène met verschillende SAR representaties.
 a) Enkelkanaals beeld (PWF). b) Tweekanaals beeld. c) Driekanaals beeld.
 d) Template segmentatiebeeld (groundtruth). Dit beeld is gesegmenteerd
 aan de hand van het optische beeld van de scène. Hierbij representeert
 blauw water, rood bebouwing, zwart kale bodem, oranje bos en groen lage
 begroeiing.*

De eerste opdracht voor de proefpersoon is een beschrijving te geven van wat het beeld voorstelt. Indien de proefpersoon een geheel onjuiste beschrijving geeft wordt de leerfase nog eens herhaald.

Er volgt nu een korte uitleg over het gebruik van de digitale kwast. De proefpersoon krijgt als taak om het water, het stedelijk gebied, het bos en de kale bodem te markeren. De rest van het beeld is de lage begroeiing omdat in de experimenten de schaduwen buiten beschouwing worden gelaten (nauwelijks te onderscheiden van water). Resultaten van verschillende proefpersonen bij verschillende representaties zijn geïllustreerd in Figuur 5.4.

Aangezien een proefpersoon vijf verschillende kleuren kan gebruiken, voor water, stedelijk gebied, bos, kale bodem en lage vegetatie elk een andere kleur, zijn er 25 stimulus respons vergelijkingen mogelijk. Vijf daarvan zijn goede antwoorden, de rest zijn verwisselingen. Immers, als een gedeelte water moet zijn kan de proefpersoon dit als water, stedelijk gebied, bos, kale bodem of lage vegetatie

markeren. Ditzelfde geldt ook voor de andere vier klassen. Door elke coördinaat in de twee beelden (gesegmenteerde beeld en groundtruth beeld) met elkaar te vergelijken worden de scores in de 5x5 verwarringsmatrix verkregen (Tabel 5.1). Na afloop van deze exercitie kan worden vastgesteld welk percentage van een terreinsoort correct is geclassificeerd. Bovendien kan worden nagegaan welke materialen met elkaar worden verward.



Figuur 5.4: Segmentatie resultaten van negen verschillende proefpersonen bij dezelfde a-c) enkelkanaals, d-f) tweekanaals en g-i) driekanaals SAR representatie. De segmentatie van deze beelden is volledig omdat initieel het gehele beeld groen is. Voor de betekenis van de kleuren zie Figuur 5.3d.

Tabel 5.1: Verwarringsmatrices in percentages. De percentages worden verkregen door te middelen over het aantal (11, 12 of 13) personen. Kaal en laag betekenen respectievelijk kale bodem en lage begroeiing. De resultaten hebben betrekking op de: a) HH, b) (HH, HV), c) (HH, HV, VV) en d) PWF representatie. De correct gemarkeerde gebieden zijn vetgedrukt weergegeven op de diagonaal. In a) geven de schuingedrukte elementen een afwijking aan naar boven (5.5) en naar beneden (1.3).

a) HH		Het is				
Is Gemarkeerd Als		Stad	Kaal	Bos	Laag	Water
	Stad	11.6	0.1	0.5	2.9	0.1
	Kaal	0.1	1.3	0.1	1.9	0.0
	Bos	0.3	0.1	6.4	2.9	0.1
	Laag	1.8	5.5	2.5	53.2	1.4
Water	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	

b) HH, HV		Het is				
Is Gemarkeerd Als		Stad	Kaal	Bos	Laag	Water
	Stad	11.7	0.0	0.3	2.2	0.0
	Kaal	0.0	4.6	0.1	1.4	0.0
	Bos	0.2	0.1	6.9	2.7	0.1
	Laag	2.0	2.0	2.3	54.2	1.3
Water	0.0	0.0	0.0	0.7	6.7	

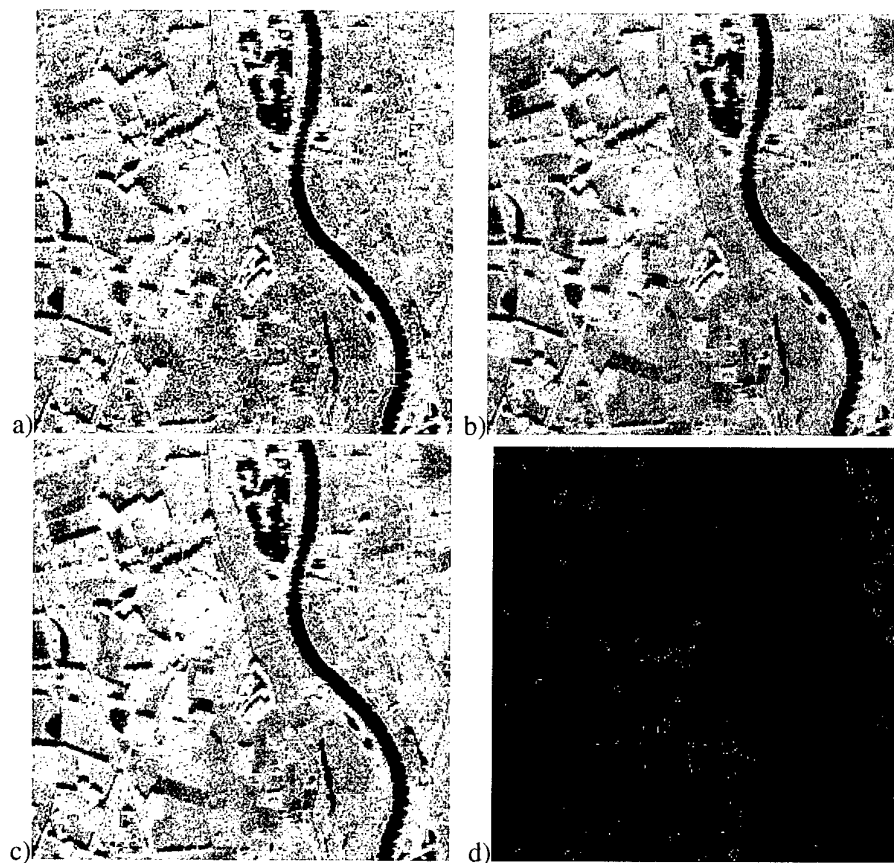
c) HH, HV, VV		Het is				
Is Gemarkeerd Als		Stad	Kaal	Bos	Laag	Water
	Stad	10.9	0.0	0.3	1.6	0.1
	Kaal	0.0	4.2	0.1	1.5	0.0
	Bos	0.4	0.1	6.2	3.1	0.1
	Laag	2.6	2.4	3.0	54.2	1.3
Water	0.0	0.0	0.1	1.2	6.7	

d) PWF		Het is				
Is Gemarkeerd Als		Stad	Kaal	Bos	Laag	Water
	Stad	12.3	0.1	0.7	3.0	0.1
	Kaal	0.0	3.5	0.0	1.3	0.0
	Bos	0.2	0.1	6.9	3.5	0.3
	Laag	1.4	3.2	2.0	52.0	1.4
Water	0.0	0.0	0.1	1.0	6.3	

5.2.3 Markeren van gebouwen

Bij het tweede experiment moeten proefpersonen man-made objects, in dit geval gebouwen, aanwijzen in SAR beelden. Bij het experiment is gekozen voor gebouwen omdat dit de meest geschikte objecten zijn in de aanwezige verzameling van SAR beelden. Omdat bovendien de scène gevarieerd moet zijn, zijn deze gebouwen met name boerderijen in een landelijke omgeving. Het gekozen SAR beeld voor dit experiment (Figuur 5.5) is een deel van het Heerde beeld (Sectie 4.2). De taak voor de proefpersonen is zo veel mogelijk gebouwen te markeren en om zo weinig mogelijk objecten foutief te markeren. Na afloop van deze exercitie kan worden vastgesteld welk percentage van de gebouwen is gevonden en welk

percentage van de gebouwen fout is gemarkeerd. Aan de hand hiervan kan worden nagegaan hoe gedetailleerd en hoe opvallend een gebouw (bijvoorbeeld een boerderij) in een SAR beeld moet worden weergegeven om aanleiding te geven tot correcte herkenning.

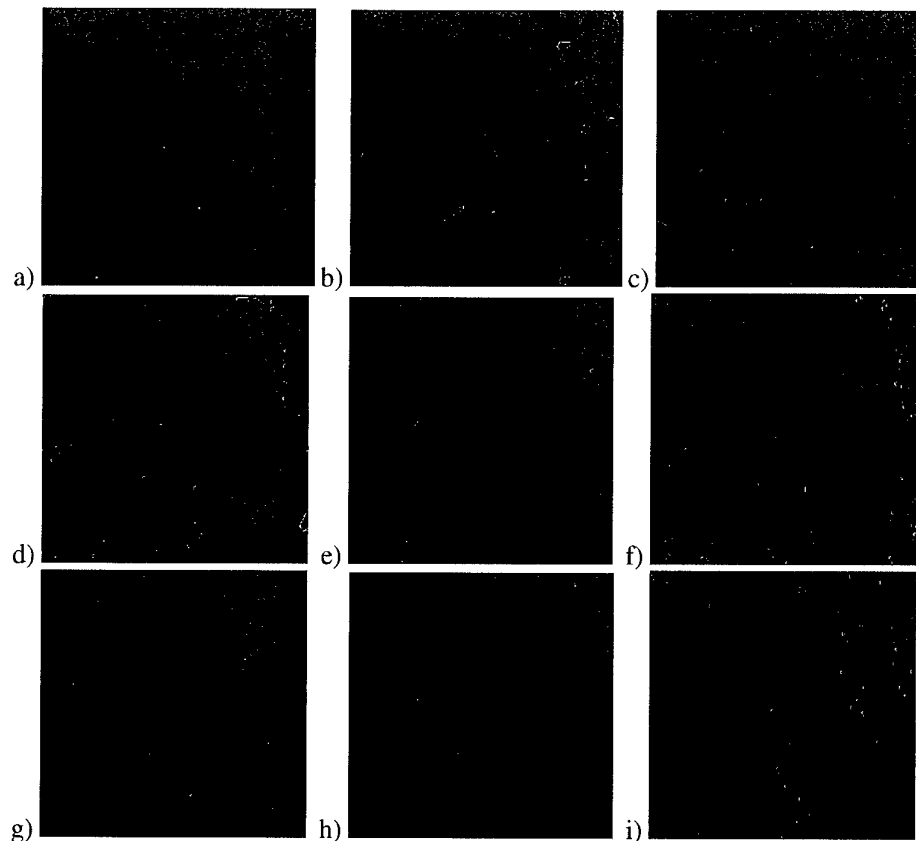


*Figuur 5.5: Beelden van dezelfde scène met verschillende SAR representaties.
a) Enkelkanaals beeld. b) Tweekanaals beeld. c) Driekanaals beeld.
d) Template doelherkenningsbeeld (groundtruth). Dit beeld is
gesegmenteerd aan de hand van het optische beeld van de scène, en geeft de
lokatie van de 150 gebouwen.*

Een door een proefpersoon gemarkeerd beeld bevat een aantal vlekken (zie ook Figuur 5.6). Aangezien het te veel werk is om voor alle beelden het aantal gemarkeerde punten met de hand te evalueren, worden de beelden automatisch verwerkt. Om een beeld automatisch te verwerken dienen alle centra van deze vlekken te worden gevonden. Om het centrum van een vlek te krijgen wordt het door de proefpersoon gemaakte beeld eerst geconvolueerd met een Gaussisch filter. Daarna worden in dit geconvolueerde beeld de lokale maxima gedetecteerd. Deze lokale maxima zijn 1 pixel groot en representeren het centrum van het gebouw. Het aantal lokale maxima komt overeen met het aantal gemarkeerde gebouwen. Een gebouw is correct gemarkeerd als het centrum van de vlek (coördinaat (x, y)) ook is

gemarkeerd in het template beeld van Figuur 5.5.

Dit "groundtruth" beeld is verkregen door een optisch beeld (van dezelfde scène) te segmenteren.



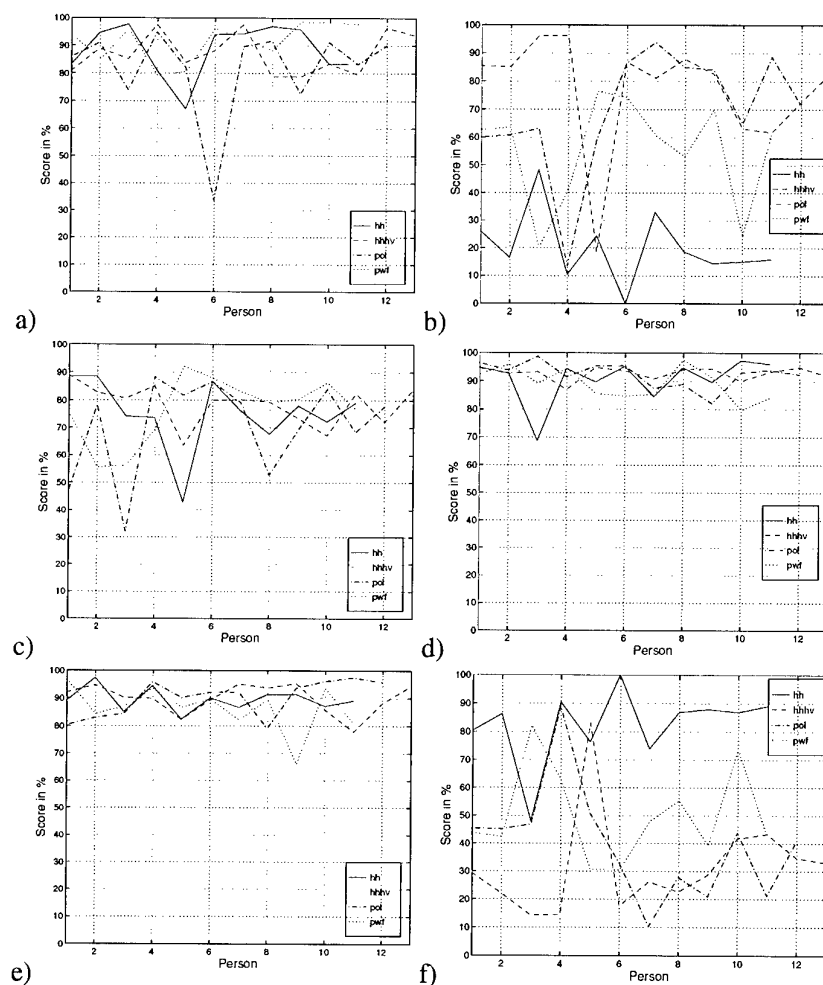
Figuur 5.6: Resultaten bij het markeren van gebouwen voor negen verschillende proefpersonen bij dezelfde a-c) enkelkanaals (PWF), d-f) tweekanaals en g-i) driekanaals SAR representatie. Uit de onderlinge (grote) verschillen blijkt dat het markeren van gebouwen een moeilijke, niet triviale taak is.

5.3 Uitwerking van de resultaten

5.3.1 Segmentatie

De segmentatieresultaten van de personen zijn weergegeven in Figuur 5.7. Dat de scores van verschillende personen zo'n tien procent van elkaar kunnen verschillen is te wijten aan de beperkte nauwkeurigheid van het inkleuren. Het markeren van stedelijk gebied is in alle vier representaties betrekkelijk eenvoudig: tussen de 80 en 100% van het stedelijk gebied wordt juist gemarkeerd (Figuur 5.7a). Slechts één persoon die een driekanaals SAR beeld heeft gesegmenteerd (nummer 6) heeft een veel kleiner deel van het stedelijk gebied ingekleurd dan er daadwerkelijk aanwezig was. Hiervoor is geen duidelijke verklaring.

De bosgebieden (Figuur 5.7c), lage begroeiing (Figuur 5.7d) en watervlakten (Figuur 5.7e) worden in alle vier de representaties ongeveer even goed gemarkeerd. De lage begroeiing en watervlakten hebben net als de stedelijke gebieden een scoringspercentage van gemiddeld zo'n 90%. Omdat de bosgebieden in het SAR beeld uit kleinere gebieden bestaat, is de onnauwkeurigheid bij het markeren in verhouding groter en daardoor het scoringspercentage wat lager, gemiddeld zo'n 70%. In Figuur 5.7b zijn de verschillen tussen de verschillende representaties groot. Hier blijkt dat bij het enkelkanaals (*HH*) SAR beeld de personen niet in staat zijn om de lage begroeiing te scheiden van de kale bodem (Tabel 5.1a). Gemiddeld wordt slechts circa 20% van de totale oppervlakte gemarkeerd. De rest wordt niet gemarkeerd (zie Figuur 5.7f). Bij het PWF beeld dat ook wordt gepresenteerd als grey tones beeld wordt ongeveer 50% van de lage begroeiing correct gesegmenteerd, terwijl bij de tweekanaals (*HH*, *HV*) en driekanaals (*HH*, *HV*, *VV*) beelden een duidelijk betere score (circa 80%) wordt gehaald. Bij zowel het tweekanaals als het driekanaals beeld is er een persoon die duidelijk minder goed presteert. Ook hier is het niet duidelijk waarom zij slechter presteren dan de andere proefpersonen.



Figuur 5.7: Scores bij het segmenteren van de SAR beelden. a) Correct gemarkeerd stedelijk gebied. b) Correct gemarkeerde kale vlakten. c) Correct gemarkeerde bosgebieden. d) Correct gemarkeerde lage begroeiing. e) Correct gemarkeerde watervlakten. f) Kale vlakte is niet gemarkeerd maar met lage begroeiing verwisseld. Hierbij corresponderen a-e) met de waarden op de diagonaal van de verwisselingsmatrix van Tabel 5.1 en f) met de waarde op de positie "het is kaal is gemarkeerd als laag" in dezelfde tabel.

5.3.2 Markeren van gebouwen

In Tabel 5.2 zijn de proefpersoon resultaten weergegeven van het markeren van gebouwen. In totaal zijn er 150 gebouwen in de scène aanwezig. Uit de resultaten blijkt dat het markeren van gebouwen in SAR beelden een moeilijke taak is. In de *HH*, (*HH*, *HV*), (*HH*, *HV*, *VV*) en PWF type beelden worden er gemiddeld respectievelijk, 4.2, 12.8, 8.1 en 6.7 procent van de gebouwen gevonden. Van de gebouwen worden er respectievelijk 7, 46, 46 en 33 procent correct gemarkeerd. Ook uit dit experiment volgt dat met het *HH* type SAR beeld (met 4.2 en 7 procent

scores) veel minder goede resultaten worden behaald dan met het PWF type beeld (6.7 en 33 procent). Wederom wordt de beste score gehaald met de (HH, HV) en (HH, HV, VV) beelden. Hierbij zijn de resultaten van deze twee beelden vrijwel identiek.

Tabel 5.2: Scores bij het markeren van gebouwen. In de rijen worden de scores voor elke persoon afzonderlijk aangegeven. De laatste rij geeft de totalen van alle personen.

HH			HH, HV			HH, HV, VV			PWF		
Gemerkt		Correct	Gemerkt		Correct	Gemerkt		Correct	Gemerkt		Correct
No.	No.	%	No.	No.	%	No.	No.	%	No.	No.	%
5	3	60	78	28	36	16	4	25	76	35	46
25	2	8	7	4	57	7	6	86	10	2	20
17	1	6	56	23	41	38	12	32	17	5	29
22	4	18	46	22	48	11	7	64	15	2	13
22	2	9	22	11	50	6	3	50	20	10	50
22	8	36	17	11	65	86	22	26	36	10	28
13	1	8	126	40	32	16	4	25	64	14	22
763	31	4	15	11	73	37	18	49	28	7	25
7	2	29	30	21	70	31	19	61	20	12	60
48	7	15	33	18	55	8	7	88	9	6	67
16	8	50	30	19	63	19	15	79	36	7	19
			28	16	57	41	28	68			
			50	26	52						
Tot.	Tot.		Tot.	Tot.		Tot.	Tot.		Tot.	Tot.	
960	69	7	538	250	46	315	145	46	331	110	33

6. Doelopsporingsexperiment

6.1 Beschrijving van het experiment

In dit experiment met hoge resolutie (0.5 m) SAR beelden is het doel om de meest geschikte representatie met betrekking tot het opsporen van doelen te vinden. In dit geval worden het aantal gevonden doelen en de snelheid waarmee deze doelen worden gevonden geëvalueerd. Een drietal verschillende representaties zijn gebruikt (zie ook Hoofdstuk 4.4):

- het enkelkanaals VV beeld (Figuur 6.1b) met felle pixels opgeschaald, dat wil zeggen dat aan alle pixels met een waarde groter dan 170 een waarde van 255 is toegekend.
- het enkelkanaals VV beeld waarop 2σ stretching, zie (4.1), is toegepast (Figuur 6.1c)
- het gesimuleerde false colours tweekanaals (*HV*, *VV*) beeld met *HV* op het rode en *VV* op het groene kleurenkanaal (Figuur 6.1d).

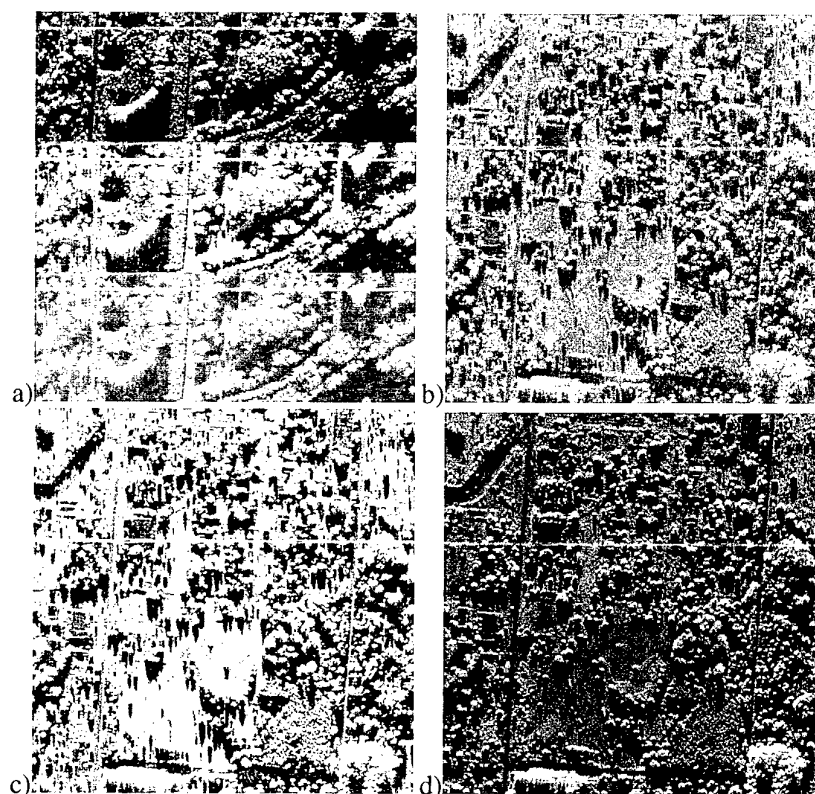
Bij het experiment heeft een proefpersoon als taak om alle doelen zo snel mogelijk te markeren. Hierbij worden alle handelingen die de proefpersoon uitvoert vastgelegd. Om leereffecten te voorkomen met betrekking tot de positie van de doelen krijgt elke proefpersoon slechts één representatie te zien.

Evenals bij het terreinanalyse-experiment wordt het feitelijke experiment voorafgegaan door een leerfase. Zowel het leerbeeld als de beelden weergegeven met de drie verschillende presentatietechnieken (Figuur 6.1) zijn 768x768 pixels groot en worden op een *17 inch iiyama vision master* met een beeldscherm resolutie van 1024x768 pixels getoond.

6.1.1 Leerfase

Bij het experiment wordt een waarnemer het leerbeeld van Figuur 6.1a aangeboden waarin alle drie representaties zijn afgebeeld. Hierbij wordt uitgelegd hoe bos, lage begroeiing en doelen er uitzien in de verschillende representaties en leert de persoon hoe de doelen kunnen worden gemarkeerd, hoe dit weer ongedaan gemaakt kan worden en hoe het experiment kan worden beëindigd. Ieder leerbeeld bestaat uit het onderste deel van de door TNO-FEL aangeleverde beelden (Sectie 4.3). Deze leerbeelden bevatten twee doelen.

Een doel wordt gemarkeerd door met de linker muisknop een positie in het digitale beeld te markeren. Er wordt dan een cirkel rond het gemarkeerde punt getekend. Als de persoon niet zeker is dat deze positie juist is gemarkeerd kan de gemarkeerde cirkel ongedaan worden gemaakt door een punt in de cirkel aan te klikken met de middelste muisknop. Als deze actie wordt uitgevoerd, wordt de cirkel weggehaald. Met de rechter muisknop wordt het experiment beëindigd en de resultaten opgeslagen. Ter oefening wordt de persoon verzocht enige tijd met de muis doelen te markeren en te demarkeren.



Figuur 6.1: a) Het leerbeeld bevat drie horizontale stroken. Elke strook bevat een andere representatie van dezelfde scène, achtereenvolgens weergegeven in b) het geschaalde grey tones enkelkanaals VV beeld, c) het 2σ gestretchte VV beeld en d) het gesimuleerde false colours tweekanaals beeld.

6.1.2 Vastleggen van data

Bij elke uitgevoerde muisklik wordt het volgende vastgelegd:

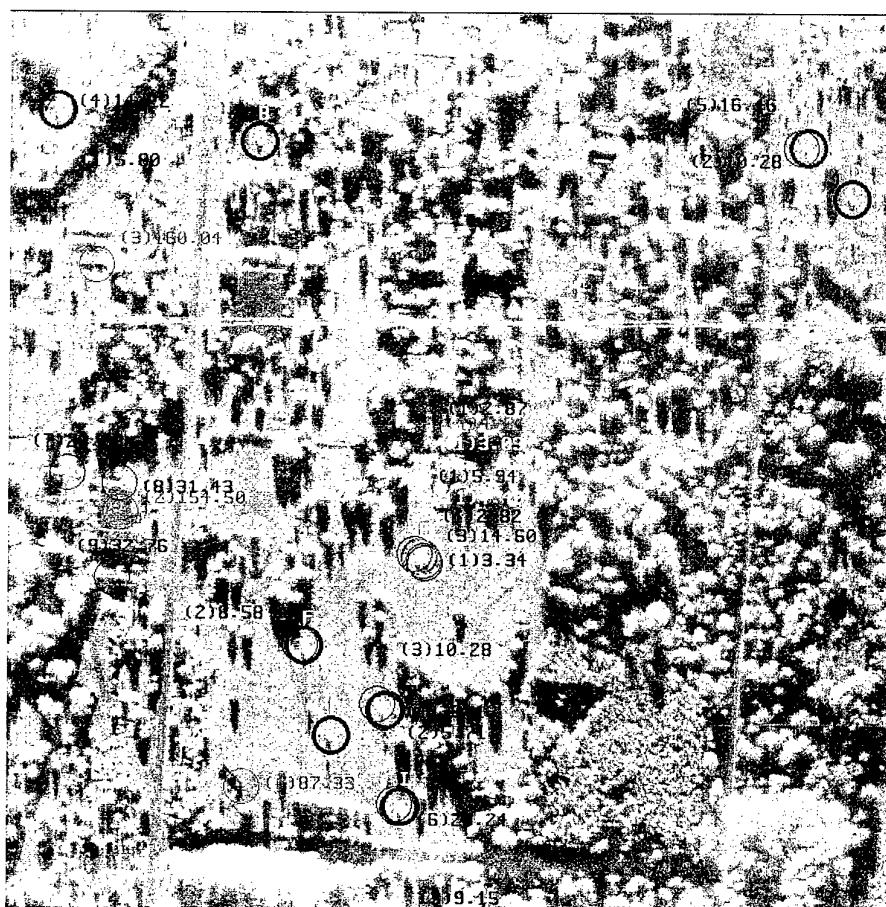
- de (x, y)-coördinaat in het beeld,
- de tijdsduur tussen de muisklik en het verschijnen van het beeld (het startsein),
- en welke button (linker, middelste of rechter) is gebruikt.

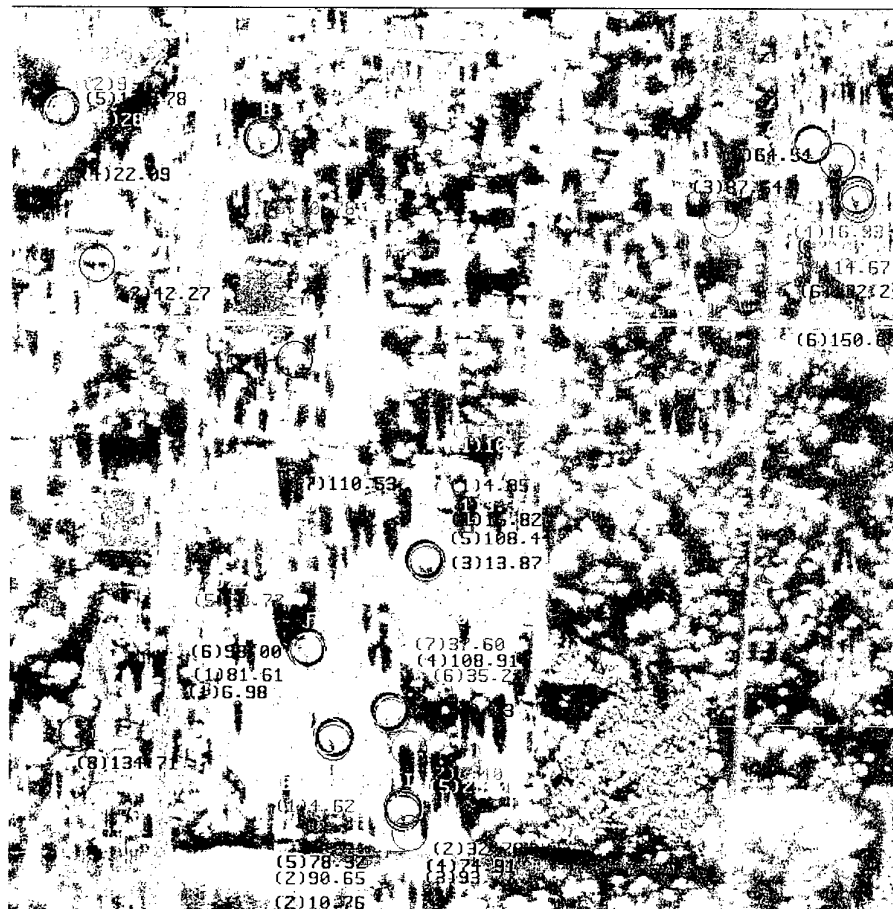
Met behulp van deze data worden het aantal correct gemarkeerde doelen en het aantal foutief gemarkeerde doelen vastgelegd. Tevens wordt de tijd van de eerste markering, de gemiddelde tijd die nodig is voor een markering en de totale tijd van het begin tot het verlaten van het experiment vastgelegd.

6.2 Uitwerking van de resultaten

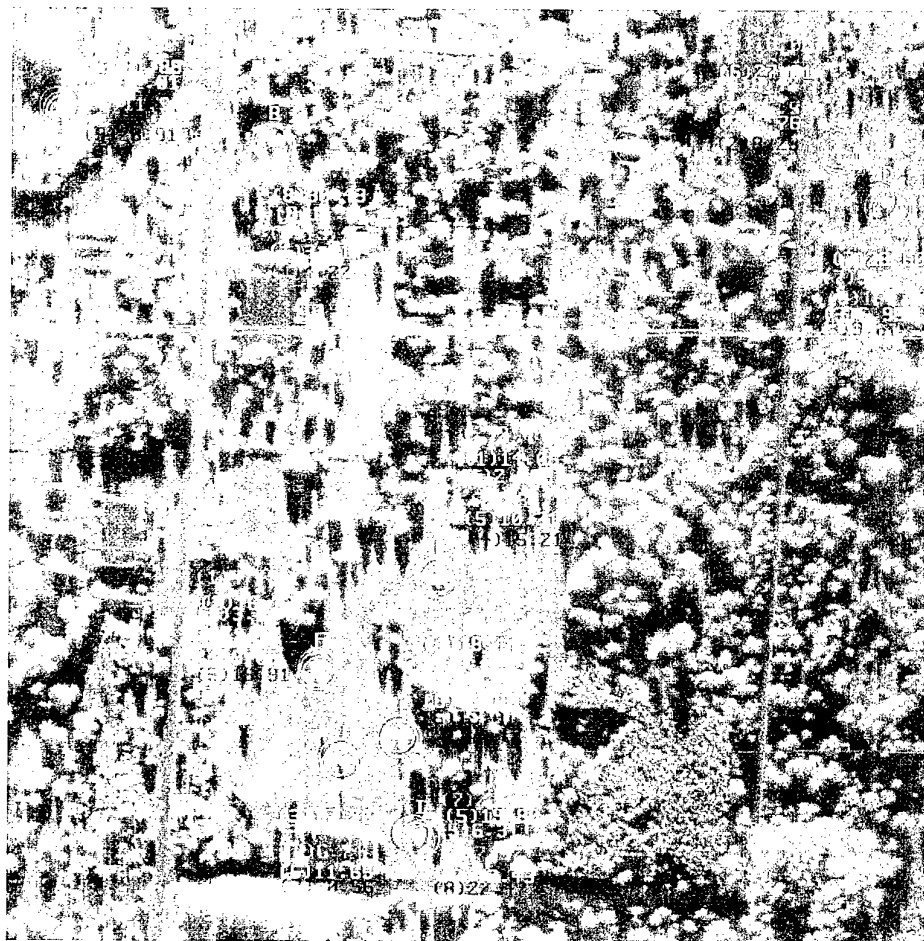
In totaal namen er 25 personen deel aan het experiment, waarvan negen het geschaalde VV beeld kregen, acht het 2σ gestretchte VV beeld, en de andere acht het gesimuleerde tweekanaals (HV, VV) beeld.

In totaal zitten er negen doelen in het beeld. Deze zijn zwart omcirkeld en hebben label A tot en met I (wit gekleurd) in Figuur 6.2, Figuur 6.3 en Figuur 6.4. Elke proefpersoon wordt aangeduid met een verschillende kleur, bijvoorbeeld de resultaten van de proefpersoon die in cyaan zijn weergegeven in Figuur 6.2 heeft negen verschillende doelen gemarkeerd. Het eerste doel E is gemarkeerd na 5.94 seconden, in de figuur is dit genoteerd als (1)5.94. Het tweede doel F is gemarkeerd na 8.58 seconden, enzovoort.





Figuur 6.3: De resultaten van acht verschillende proefpersonen, elk weergegeven in een andere kleur in het 2σ gestrekte VV beeld. De doelen hebben witte labels A tot en met I en zijn zwart omcirkeld. De positie van elk gemarkeerd doel is weergegeven met behulp van een cirkel en bovendien worden de volgorde (het nummer dat tussen haakjes is weergegeven) en de tijdsduur vanaf het startsein van het markeren weergegeven.



Figuur 6.4: De resultaten van acht verschillende proefpersonen, elk weergegeven in een andere kleur in het gesimuleerde (HV, VV) false colours beeld (zie voor het kleurenbeeld Figuur 6.1d). Voor een betere visualisatie is de achtergrond monochroom weergegeven. De doelen hebben witte labels A tot en met I en zijn zwart omcirkeld. De positie van elk gemarkeerd doel is weergegeven met behulp van een cirkel en bovendien worden de volgorde (het nummer dat tussen haakjes is weergegeven) en de tijdsduur vanaf het startsein van het markeren weergegeven.

6.2.1 Observatie

Uit Figuur 6.2 constateren we dat in het geschaalde VV beeld doel E door bijna alle waarnemers wordt gevonden. Dit is goed te verklaren omdat dit doel in een uniforme omgeving staat. Drie doelen worden door geen enkele persoon gedetecteerd (B, D en H). Twee van de negen personen hebben verkeerde doelen gemarkeerd, hiervan heeft de ene persoon eerst zes doelen correct gemarkeerd en vervolgens drie foutief. De andere persoon heeft naar heel kleine doelen gezocht en erg lang tijd nodig gehad om drie doelen foutief te markeren.

Uit Figuur 6.3 constateren we dat alle doelen door ten minste twee van de acht personen worden gevonden. De doelen E tot en met I in het centrum van het beeld

worden iets vaker gevonden dan de doelen B en C, respectievelijk links en rechts boven in het beeld. De foutief gemarkeerde doelen in Figuur 6.3 lijken meer op een doel dan de foutief gemarkeerde doelen in Figuur 6.2. Een persoon heeft veel (vier) foutieve doelen gemarkeerd. Twee andere personen maken beiden één fout. Doordat dit beeld meer detail bevat zijn de zoektijden langer dan die van Figuur 6.2 (zie ook Sectie 6.2.2).

Uit Figuur 6.4 constateren we dat alle doelen door ten minste zes van de acht personen worden gevonden. Bovendien worden ze erg snel gevonden ten opzichte van de twee vorige representaties. Er is een persoon geweest die slechts twee doelen heeft gemarkeerd die beide fout zijn, vijf personen markeerden alle doelen correct en de andere twee markeerden acht van de negen doelen correct.

6.2.2 Zoektijden en gedetecteerde doelen

Uit de data van Tabel 6.1 volgt dat voor de verschillende typen beelden, VV geschaald, VV 2σ gestretcht en HV, VV gesimuleerd, er respectievelijk 22, 60 en 85 procent van de doelen worden gevonden door de proefpersonen. Het verschil tussen het gesimuleerde tweekanaals beeld en het 2σ gestretchte beeld is significant (zelfs groter dan 3σ). Ook in het 2σ gestretchte beeld worden er significant meer doelen gevonden dan in het geschaalde VV beeld.

De snelheid van het vinden van de doelen in het gesimuleerde tweekanaals beeld is veel beter dan in de andere twee typen beelden. In eerste instantie lijken de zoektijden in het geschaalde VV beeld beter dan in het VV 2σ gestretchte beeld, maar als we de tijden gaan delen door het aantal gevonden doelen, dan blijkt dat de gemiddelde zoektijd per doel veel lager is in het gestretchte beeld, immers, er worden meer doelen gevonden in het gestretchte beeld.

Tabel 6.1: In de linkerkolom zijn de drie verschillende representaties weergegeven. De tweede, derde, vierde en vijfde kolom geven, respectievelijk, de gemiddelde score (percentage) van het correct aantal gemarkeerde objecten (hit), de gemiddelde score (percentage) van de foutief gemarkeerde objecten (false alarm), en de gemiddelde zoektijd en standaard deviatie in seconden weer.

Type beeld	Hit	False alarm	Tijd	Tijd per doel
VV geschaald	22.22	7.44	50.3 ± 15.81	37.11 ± 16.44
VV 2σ	59.72	8.33	83.0 ± 20.71	17.49 ± 5.10
HV, VV	84.72	2.78	25.3 ± 2.60	5.18 ± 2.17

7. Overzicht van de experimentresultaten

Er is gebleken dat er geen transformatie bestaat om de kleuren in een SAR beeld, zoals verkregen door het aansluiten van de polarimetrische kanalen op de kleurkanalen, te transformeren naar optische kleuren, dat wil zeggen kleuren zoals die door het menselijk oog worden waargenomen. De reden is dat de terreintypen verschillende reflectie-eigenschappen hebben voor microgolven (SAR) en zichtbaar licht (optische sensor). Hierdoor is er geen één op één relatie tussen de kleur van een object in een SAR beeld en de kleur van het object in een optisch beeld, dat wil zeggen dat verschillende optische kleuren dezelfde kleur kunnen hebben in een SAR beeld. Als voorbeeld; twee corner reflectoren waarvan de één een rode en de ander een blauwe (optische) kleur heeft zullen in het SAR beeld beide als witte reflecties zichtbaar zijn.

Het feit dat een SAR beeld niet als een optisch beeld kan worden weergegeven heeft tot gevolg dat er een leerproces vereist is voor het interpreteren van de terreinachtergrond en doelen in SAR beelden. In deze cyclus moet de personen worden uitgelegd hoe de verschillende terreinsoorten en doelen er in een SAR beeld uit zien.

7.1 Resultaten terreinanalyse-experiment

Er is een proefpersoonexperiment uitgevoerd waarbij een aantal personen enkelkanaals beelden (*HH* beeld en PWF beeld) en meerkanaals beelden (tweekanaals *HH*, *HV* beeld en driekanaals *HH*, *HV*, *VV* beeld) moesten segmenteren in stad, water, bos, lage vegetatie en kale bodem. Ook moesten in deze vier beelden boerderijen worden gemarkeerd. Uit dit experiment zijn de volgende resultaten verkregen.

Van stad, water, lage vegetatie en bosgebieden wordt ongeveer 70-90% correct gemarkeerd voor alle vier beelden. In geval van kale bodem velden wordt ook ongeveer 70-90% correct gemarkeerd in het tweekanaals (*HH*, *HV*) beeld en in het driekanaals (*HH*, *HV*, *VV*) beeld maar in het PWF beeld bedraagt deze score 50%, terwijl in het *HH* beeld slechts 20% van de kale bodem velden correct wordt gemarkeerd. Het merendeel van de kale bodem velden, dat wil zeggen ongeveer 80%, wordt in het *HH* beeld verward met lage vegetatie. In het PWF beeld bedraagt de confusie tussen kale bodem velden en lage vegetatie ongeveer 50% en voor de overige twee beelden ongeveer 30%.

De confusie van kale bodem als lage vegetatie in het *HH* beeld komt voornamelijk tot stand door de speckle in het *HH* beeld. De reductie van de speckle in het PWF beeld verlaagt deze confusie aanzienlijk. Echter, voor het vervaardigen van een PWF beeld is een volledig polarimetrische (drie kanalen) SAR nodig. Het blijkt dat met een tweekanaals (*HH*, *HV*) SAR de confusie in gelijke mate kan worden gereduceerd.

Dit laat duidelijk het belang zien van een tweede polarimetrische kanaal, dat wil zeggen *HV*, voor interpretatie van de terreinachtergrond maar ook dat een derde kanaal (*HH* complementair op *VV* of *VV* complementair op *HH*) niet meer wezenlijk bijdraagt voor interpretatie.

Het vinden van gebouwen (in dit geval boerderijen) in een SAR beeld is niet eenvoudig. Dit blijkt uit het feit dat in de vier beelden gemiddeld slechts 10% van de boerderijen wordt gevonden. Van de als boerderij gemarkeerde pixels waren correct gemarkeerd (dat wil zeggen daadwerkelijk boerderij) 7%, 33%, 46% en 46% voor respectievelijk het *HH* beeld, het PWF beeld, het (*HH*, *HV*) beeld en het (*HH*, *HV*, *VV*) beeld. Ook hier blijkt weer het nut van een tweede kanaal voor interpretatie en dat een derde kanaal niet wezenlijk bijdraagt wat interpretatie betreft.

7.2 Resultaten doelopspringexperiment

Er is een proefpersoonexperiment uitgevoerd waarbij een aantal personen doelen moesten detecteren in een hoge resolutie *VV* SAR opname weergegeven als 2σ -gestretcht beeld, een beeld waarin de felle pixels zijn opgeschaald, en een (*HV*, *VV*) tweekanaals beeld waarvan het *HV* kanaal is gesimuleerd. Bij dit experiment werd ook de benodigde tijd opgenomen om de doelen aan te geven. Uit dit experiment zijn de volgende resultaten verkregen.

In het enkelkanaals *VV* beeld met opgeschaalde felle reflecties zijn de doelen het moeilijkst te vinden. Slechts 22% van de doelen wordt gevonden in gemiddeld 50 seconden. In het 2σ gestretchte *VV* beeld is dit 60% maar de personen doen er langer over om de doelen te vinden, gemiddeld 80 seconden. Stretchen verhoogt het contrast tussen de doelen en de terreinachtergrond zodanig dat de doelen duidelijk naar voren komen. Echter, delen van bosgebieden en afzonderlijke bomen worden ook met sterk contrast ten opzichte van de achtergrond weergegeven. Hierdoor wordt het beeld "drukker" zodat de personen langer nodig hebben om de doelen te vinden. Het geschaalde beeld doet rustiger aan zodat de doelen sneller worden gevonden. Echter, om te voorkomen dat afzonderlijke bomen ook worden opgeschaald kon de schalingsfactor niet te hoog worden gekozen. Hierdoor zijn de doelen wat moeilijker te detecteren dan in het gestretchte beeld, dat wil zeggen, de doelen worden weliswaar sneller gevonden, maar in totaal worden er minder doelen gevonden.

Het gesimuleerde tweekanaals beeld geeft veruit de beste resultaten. Ongeveer 85% van de doelen wordt gevonden en wel in gemiddeld 25 seconden. Evenals het terreinanalyse-experiment geeft dit resultaat het belang aan van een tweede kanaal ter verbetering van de interpretatie van SAR beelden, zij het dat voor doeldetectie de resolutie voldoende hoog moet zijn.

8. Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

Bij het visueel interpreteren van SAR beelden presteert een tweekanaals weergave van een SAR beeld beter ten behoeve van terreinanalyse en doelopsparing dan een enkelkanaals weergave. Het toevoegen van het derde polarimetrische kanaal voegt weinig aan interpretatie toe. Dit kan worden verklaard doordat twee van de drie kanalen radiometrisch gecorreleerd zijn.

Uit een analyse is gebleken dat SAR en optische beelden wezenlijk andere informatie bevatten. Hierdoor is er geen één op één relatie tussen de kleur van een object in een SAR beeld en de kleur van het object in een optisch beeld.

Uit de resultaten van de proefpersoon experimenten is duidelijk naar voren gekomen dat een tweekanaals SAR beter presteert voor beeldinterpretatie dan een enkelkanaals SAR. Tevens werd duidelijk dat een derde polarimetrische kanaal weinig meer toevoegt voor visuele beeldinterpretatie. Omdat een volledig polarimetrische SAR (drie kanalen) een extra zendmode vereist ten opzichte van een tweekanaals SAR kan dit resultaat van belang zijn indien er volume en gewichtseisen aan een SAR ontwerp worden gesteld. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer een SAR op een Remotely Piloted Vehicle (RPV) wordt geplaatst. Een relevant onderwerp voor verdere studie is derhalve om visuele beeldinterpretatie met twee en drie kanalen verder te evalueren en dit af te zetten tegen de gewichts- en volumevoordelen van een tweekanaals SAR op een klein platform zoals een RPV.

In dit project is gekeken naar een *statische* weergave van SAR beelden, dat wil zeggen dat het eenmaal verkregen beeld onveranderlijk aan de interpreteur wordt aangeboden. Het verdient aanbeveling om een *interaktieve* weergave van SAR informatie te onderzoeken, hetgeen inhoudt dat de beeldinformatie van de terreinachtergrond en de doelen naar voor kan worden gehaald en naar achter kan worden gedrukt. Het aantrekkelijke van een dynamische weergave is uiteraard dat de doelen en de terreinachtergrond vrijwel gelijktijdig optimaal voor interpretatie kunnen worden bekeken door de beeldintensiteit te variëren.

9. Referenties

Broek, A.C. Van den, R.J. Dekker, A.J.E. Smith, and J.S. Groot, Grondwaarnemingen met Synthetische Apertuur Radar, Beleidscommissie Remote Sensing, NRSP-2, 98-26, januari 1999.

ERDAS Field Guide, ERDAS Inc. Atlanta CA, 3rd edition, 1995.

Gonzales, R.C., and R.E. Woods, Digital image processing, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.

Larson, V., and L.M. Novak, Polarimetric subspace target detector for SAR data based on the Huynen dihedral model, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II, 19-21 April, SPIE, Vol. 2487, pp. 235-250, 1995.

Lee, J.S., M.R. Grunes, and R. Kwok, Classification of multi-look polarimetric SAR imagery based on complex Wishart distribution, Int. J. Remote Sensing, vol. 15, no. 11, pp. 2299-2311, 1994.

Lillesand, T.M., and R.W. Kiefer, Remote sensing and image interpretation, John Wiley & Sons, 1987.

Nghiem, S.V., S.H. Yueh, R Kwok, and F.K.Li, Symmetry properties in polarimetric remote sensing, Radio Science, vol. 27, no. 5, pp. 693-711, 1992.

Novak, L.M., and M.C. Burl, Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 2, March 1990, pp. 293-305.

Oliver, C., and S. Quegan, Understanding Synthetic Aperture Images, Artech House, 1998.

Skolnik, M.I., Introduction to radar systems, McGraw-Hill Book Company, 1962.

10. Ondertekening

Prof.ir. P. Hoogboom
Groepsleider



Dr. A.C. van den Broek
Projectleider/Auteur



**REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)**

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) TD99-0272	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO TM-99-A078/FEL-99-A211
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 60401	5. CONTRACT NO A99CO315	6. REPORT DATE November 1999
7. NUMBER OF PAGES 73 (incl RDP, excl distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 10	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Visuele Interpretatie van SAR Beelden (Visual Interpretation of SAR Images)		
11. AUTHOR(S) A.J.E. Smith (TNO-FEL), Dr A.C. van den Broek (TNO-FEL), Dr T. Lourens (TNO-TM), Dr A. Toet (TNO-TM)		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Physics and Electronics Laboratory, PO Box 96864, 2509 JG The Hague, The Netherlands Oude Waalsdorperweg 63, The Hague, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) DS/CZ-TB PO Box 20701, 2500 ES The Hague, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified, Stg. Confidentieel is equivalent to Confidential and Stg. Geheim is equivalent to Secret.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) SAR images are difficult to interpret for non-trained persons because these images are fundamentally different from optical images. The goal of the project was to find out how SAR images should be displayed in order to facilitate the interpretation of these images for terrain interpretation and target acquisition. This project was a combined effort by TNO-FEL and TNO-TM. In the project polarimetric PHARUS images and high resolution RAMSES images were used for two experiments where people were tested for their ability to find targets and to interpret the terrain. The PHARUS data were displayed in grey tones and false colours. The false colours were obtained by displaying two or more polarisation channels in the colour channels of the screen. In this way a single, two and three channel presentation was obtained. The experiments showed that the two-channel presentation is more effective than the single channel presentation for visual interpretation of the images. The three-channel presentation did not improve the scores of the experiments significantly. This result is important when a SAR is used on a UAV, since it is clearly easier to mount a two-channel than a three-channel SAR on a UAV.		
16. DESCRIPTORS Synthetic Aperture Radar Image Interpretation		IDENTIFIERS Visual Image Interpretation Terrain Analysis Target Detection
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

Distributielijst

1. DWOO
2. HWO-KM*
3. HWO-KL*
4. HWO-KLu*
5. HWO-CO
6. DS/CZ-TB, t.a.v. Ir. J.B.J. Orbons
7. DM&P TNO-DO
8. Directeur TNO-PML*
9. Directeur TNO-TM*
10. Accountcoördinator CO*
- 11 t/m 13. Bibliotheek KMA
14. DMKL/T&WO, t.a.v. Ir. N. Pos
15. DMKL/INFO, t.a.v. Ir. Klein
16. DS/CIS, t.a.v. KLTZ J.B.M. Ouwers
17. 101 RPV Compagnie, t.a.v. Maj F. Muller
18. DGM, t.a.v. LKol ir.ing. J.W.E.N. Kaelen
19. KMA, t.a.v. Ir. J. Rogge
20. OCEDE/KCEN/MID, t.a.v. LKol W.G.F. van Kempen
21. DOPKLu/STAORE, t.a.v. Maj ir. T.W.G. de Laat
22. DOPKLu, t.a.v. Maj R. van der Waal
23. LAS/BO, t.a.v. LKol A. Dondorp
24. OCVUST, Sie Interne Plannen, t.a.v. Maj A. Hoogedoorn
25. DMKM/WCS/COSPON, t.a.v. Drs. W. Pelt
26. TNO-TM, t.a.v. Dr. T. Lourens
27. TNO-TM, t.a.v. Dr. A. Toet
28. Directeur TNO-FEL
29. Adjunct-directeur TNO-FEL, daarna reserve
30. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan MPC*
31. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Accountmanager CO*
32. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Ir. C.J. den Hollander
33. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Prof.ir. P. Hoogeboom
34. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan G.D. Klein Baltink
35. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Drs. D. van Halsema
36. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Dr. H.S.F. van Wimersma Greidanus
37. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Dr. W.L. van Rossum
38. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Dr. A.C. van den Broek
39. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Drs. B.J.E. Smeenk
40. Archief TNO-FEL, in bruikleen aan Drs. J. Vink
41. Documentatie TNO-FEL
42. Reserve

Indien binnen de krijgsmacht extra exemplaren van dit rapport worden gewenst door personen of instanties die niet op de verzendlijst voorkomen, dan dienen deze aangevraagd te worden bij het betreffende Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek of, indien het een K-opdracht betreft, bij de Directeur Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling.

* Beperkt rapport (titelblad, managementuittreksel, RDP en distributielijst).